



Instituto de Recursos Naturales
y Agrobiología de Sevilla

Respuesta del olivo a tratamientos de riego deficitario

Titulación:
Ingeniería Técnica Agrícola
Especialidad en Explotaciones Agropecuarias

Directores:

Dra. D^a. María José Martín-Palomo García

Dr. D. José Enrique Fernández Luque

Alumno:

D. Juan Manuel Larios Sotelo

Sevilla , Enero 2008

Cod. Barras/ 52 0 54 7

N.º R. ALEPH	1159453
N.º R. Bib.	5931
Signat.	TFC-66

Respuesta del olivo a tratamientos de riego deficitario

Titulación:
Ingeniería Técnica Agrícola
Especialidad en Explotaciones Agropecuarias

Directores:

Dra. D^a. María José Martín-Palomo García

Dr. D. José Enrique Fernández Luque



Alumno:

D. Juan Manuel Larios Sotelo



AGRADECIMIENTOS

Llegado el final de esta etapa, parte importante de mi vida, me gustaría agradecer a las personas y a las instituciones implicadas que fueron importantes en este periodo.

Gracias a toda mi familia, por su apoyo y comprensión durante la realización de este trabajo y durante todo el periodo universitario.

Gracias a mis directores Dra. D^a. María José Martín-Palomo García y Dr. Don José Enrique Fernández Luque por su plena disposición y su inestimable ayuda.

Gracias al Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, perteneciente al CSIC y a todo el personal de la finca experimental “La Hampa”, por su colaboración en la realización de este trabajo.

Gracias a D^a Vanessa Chamorro, D. Antonio Díaz-Espejo, D. Ignacio Girón, D. Juan Manuel Infante, D. Luis Villagarcía y D. Pablo Durán por su valiosa ayuda y colaboración.

Gracias a mi compañero de trabajo de campo Francisco Javier Cornejo Lobato.

Gracias, como no, a mis compañeros de la E.U.I.T.A., por todo lo que hemos compartido; a Ana Belén Martínez Zarapico, Josefa Cabrera Pérez, Rosario Herrera Morcillo, Manuela Vilches Solís, Antonio Jesús Lluvia Delgado, Juan Manuel Sánchez Salgado, Jonathan Miguez Vázquez y por supuesto a mi siempre compañera Sara Llopis Anaya.

INDICE

1. Introducción	4
1.1. Generalidades e importancia del cultivo del olivo	5
1.2. Respuesta del olivo al riego	6
1.3. Modalidades de riego utilizadas en olivar	8
1.3.1. Método recomendado por la FAO	9
1.3.1.1. Cálculo de ET_0	10
1.3.1.2. El coeficiente K_c	11
1.3.1.3. El coeficiente K_r	11
1.3.1.4. Consideraciones del método FAO	12
1.3.2. Modalidades de riego deficitario	13
2. Objetivos	17
3. Materiales y métodos	19
3.1. Descripción de la finca experimental	20
3.1.1. Situación	20
3.1.2. Clima	20
3.1.3. Suelo	22
3.1.4. Parcela experimental	22
3.2. Manejo del cultivo	23
3.2.1. Laboreo y tratamientos fitosanitarios	23
3.2.2. Tratamientos hídricos	24
3.2.3. Fertilización	27
3.3. Respuesta del cultivo a los tratamientos hídricos	28
3.3.1. Evolución del agua en el suelo	28
3.3.2. Crecimiento de ramos	32
3.3.3. Estado fenológico	32
3.3.4. Evolución del área foliar en árboles regados deficitariamente	33
3.3.5. Potencial hídrico del tronco	34
3.3.6. Intercambio gaseoso de las hojas	35
3.3.6.1. Conductancia estomática	35

3.3.6.2. Fotosíntesis neta	36
3.3.7. Cuantificación del consumo hídrico en los árboles regados deficitariamente	37
4. Resultados y discusión	41
4.1. Condiciones meteorológicas	42
4.2. Respuesta del cultivo a los tratamientos hídricos	42
4.2.1. Evolución del agua en el suelo	42
4.2.2. Crecimiento de ramos	45
4.2.3. Estado fenológico	47
4.2.4. Evolución del área foliar en árboles regados deficitariamente	48
4.2.5. Potencial hídrico del tronco	50
4.2.6. Intercambio gaseoso de las hojas	52
4.2.6.1. Conductancia estomática	52
4.2.6.2. Fotosíntesis neta	53
4.2.7. Cuantificación del consumo hídrico en los árboles regados deficitariamente	55
5. Conclusiones	60
6. Bibliografía	62

1. Introducción

1. Introducción

1.1. Generalidades e importancia del cultivo del olivo

El olivo, *Olea europaea* L., es una planta perenne y subtropical de gran longevidad, siendo probablemente el más resistente al frío de los frutales subtropicales (Denney y McEachern, 1985). El hábitat del olivo se localiza entre 30° y 45° de latitud, tanto en el hemisferio norte como en el sur, en regiones climáticas del tipo Mediterráneo, caracterizadas por un verano seco y caluroso (Hartmann, 1953; Yáñez y Lachica, 1971).

El cultivo del olivo y la producción de aceite de oliva han estado concentrados en los países de la zona mediterránea: España, Portugal, Grecia, Italia, Turquía, Túnez y Marruecos. Estos países representan prácticamente el 90% de la producción mundial. La producción media mundial en la década de los 90 fue de 2.060.000 toneladas por año, mientras que en las dos últimas campañas la media ha sido de 2.450.000 toneladas. De esta producción, el 76% proviene de la UE, el 8% de Túnez, el 5% Turquía y el 3% de Marruecos el resto se reparte entre diversos países.

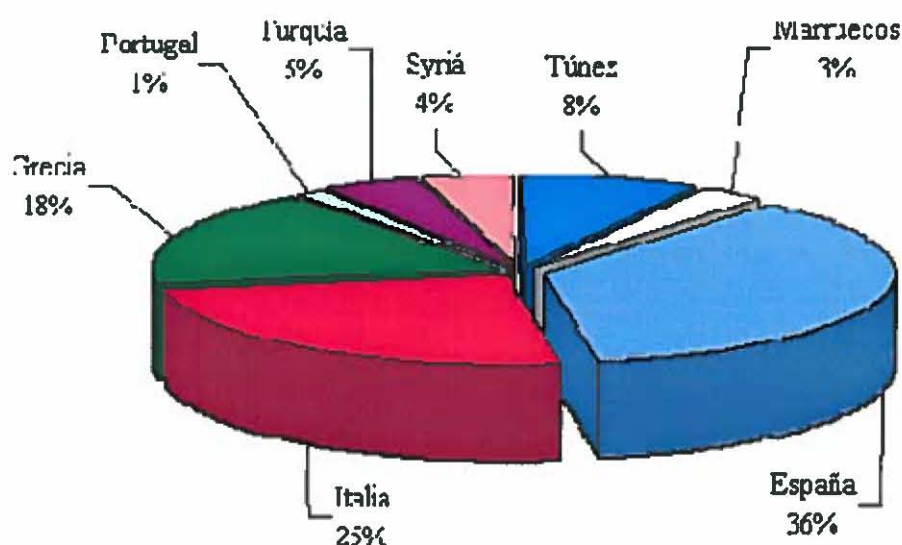


Figura 1.1. Distribución de la producción de aceite de oliva en el mundo.

Según fuentes del Consejo Oleícola Internacional (COI, 2001), la importancia del cultivo del olivo va en aumento. Así, de las 8.580.000 ha de olivar cultivadas en el mundo en 1996, se ha pasado a unas 9.100.000 ha en el año 2000, y se estima que esta cifra ascenderá en el mundo hasta unos 10.000.000 ha en el 2010. Destaca el marcado incremento de superficie destinada al cultivo del olivar en zonas alejadas de la cuenca mediterránea, como Australia y Estados Unidos.

El cultivo del olivo es una de las actividades más importante de la agricultura española, cultivándose en casi todo el territorio nacional excepto en las comunidades autónomas de Asturias, Cantabria y Galicia. Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, la superficie de olivar en España es de 2.291.400 ha (MAPA, 2001), encontrándose el 62% de la misma en Andalucía (1.429.200 ha). Además, España es el primer productor de aceite de oliva del mundo, solo desplazada por Italia en ocasiones, siendo su producción de 1.422.000 toneladas de aceite, (MAPA, Subdirección General de Estadística Agroalimentaria).

La superficie andaluza destinada al cultivo del olivo representa aproximadamente el 30% de la superficie europea empleada para el mismo fin. Esto indica la importancia que tiene el cultivo del olivar andaluz en la economía de la región y de España en general.

1.2. Respuesta del olivo al riego

El olivo muestra una buena adaptación a la sequía, siendo capaz de dar producciones aceptables en plantaciones de secano, en zonas en las que la pluviometría anual está alrededor de los 500 mm, con una duración de la estación seca de cinco o seis meses (Fernández y Moreno, 1999). A pesar de esto, el riego resulta una práctica importante para incrementar la producción y la rentabilidad de las explotaciones olivareras.

Por una parte, la planta responde muy favorablemente al riego, aunque la dosis aplicada sea pequeña (Abd-el-Rahman y el El-Sharkawi, 1974; Lavee y col.,

1990; Pastor y Orgaz, 1994; Goldhamer, 1997; Fernández y col., 1997). Por otro lado, en las plantaciones intensivas el aumento de la densidad de plantación trae consigo un aumento de las necesidades hídricas de la explotación, resultando insuficientes los aportes por lluvia en la mayoría de las zonas de cultivo, siendo preciso el riego para suplir ese déficit.

La superficie de olivar en regadío, de hecho, ha aumentado considerablemente en los últimos años. En la cuenca mediterránea se riega el 15% de la superficie de olivar; de las nuevas plantaciones, el 35% dispone de un sistema de riego. El 50 % de la superficie está constituida por olivar tradicional, con el 35% aproximadamente de la producción total; el 30% es de olivar intensivo (50% de la producción), y el 20% restante es de olivar marginal (15% de la producción). La magnitud de la superficie de olivar regada, junto con la escasez de agua en las áreas en las que se cultiva esta especie, ha despertado un interés creciente acerca de nuevas técnicas para una estimación cada vez más exacta de la dosis de riego, así como técnicas de riego deficitario, que permiten un ahorro de agua a pesar de mantener niveles altos de producción.

El olivo, como cualquier planta que ha evolucionado en clima mediterráneo, mantiene un delicado equilibrio entre fotosíntesis y transpiración. Fereres (1984) midió el comportamiento estomático del olivo frente al del girasol, en condiciones de elevado suministro de agua, observando que el olivo presenta su mayor apertura estomática en las primeras horas del día, reduciendo dicha apertura en las horas centrales, y decreciendo aún más durante la tarde. La conductancia estomática fue de hasta un 50% de la observada en girasol. Este comportamiento tiene un gran valor adaptativo en condiciones limitantes de agua.

El riego localizado de alta frecuencia es el más utilizado actualmente en olivar. Esto se debe a que minimiza las pérdidas de agua tanto por evaporación (al ser la superficie mojada mínima) como por escorrentía. También disminuyen los daños por erosión en suelos con pendiente, y se logra una buena homogeneidad en la aplicación del agua a los árboles, siempre que el sistema se cuide adecuadamente (Orgaz y Fereres, 1997; Fernández y col., 1998a).

Mientras que las producciones habituales del olivar tradicional en secano oscilan entre 2.000 y 5.000 kg/ha/año según zonas, la producción de olivares bien regados, capaces de interceptar la mayor parte de la radiación incidente, puede acercarse a los 15.000 kg/ha/año para aceituna de almazara e incluso superarla en el caso de aceituna de mesa (Goldhamer y col., 1994).

1.3. Modalidades de riego utilizadas en olivar

Tradicionalmente el olivar se ha cultivado en condiciones de secano. Se trata de un cultivo que está muy bien adaptado a periodos de intensa sequía, manteniendo unas producciones aceptables. A pesar de ello, el agua es un factor fundamental para el crecimiento y la producción del olivo.

La mayoría de los olivares se encuentran en zonas donde la disponibilidad de agua para el uso agrícola es escasa, por lo que la optimización del riego es fundamental para obtener la mayor rentabilidad de la explotación con el menor uso posible de agua.

La práctica habitual, por tanto, es la instalación de un sistema de riego por goteo para reducir al máximo las pérdidas, como ya se comentó.

Para la determinación de las necesidades hídricas de un cultivo, se puede hacer un balance hídrico en la parcela, en el que la incógnita es la cantidad de agua consumida por el cultivo, o evapotranspiración del cultivo (ET_c , mm):

$$ET_c = P + R - \Delta AA - D - e_s \quad ,$$

donde P (mm) es la lluvia, R (mm) es el agua aplicada por el riego, ΔAA (mm) es la diferencia de agua almacenada en el perfil del suelo explorado por las raíces, entre el primer y el último día del periodo considerado, D (mm) es el agua perdida por drenaje y e_s (mm) es el agua perdida por escorrentía. También se pueden

utilizar métodos menos laboriosos y que permitan un cálculo más frecuente de ET_c , como el que se menciona a continuación.

1.3.1. Método recomendado por la FAO

La dosis de riego (DR) de una plantación puede terminarse con la siguiente ecuación:

$$DR = ET_c - P_e + P_{sr} + L \quad ,$$

donde P_e es la precipitación efectiva (P_e , mm) que se calcula como un porcentaje de la precipitación total, normalmente el 70%, aunque este valor puede ser más bajo en las parcelas con pendiente o con una baja tasa de infiltración, y mayor en parcelas llanas con suelo de alta tasa de infiltración. Cuantificar con precisión P_e no es fácil; implica tener información sobre la distribución de las raíces (Fernández y col., 1991), las pérdidas de agua por evaporación del suelo de la parcela (Bonachela y col., 2001), y el agua interceptada por la copa (Gómez y col., 2001), entre otros aspectos. Las pérdidas del sistema de riego (P_{sr} , mm) pueden considerarse nulas en los sistemas de riego localizado de la mayoría de los olivares comerciales.

Salvo en el caso de riegos con aguas de baja calidad, las necesidades de lavado (L , mm) también son despreciables en un clima como el nuestro, en el que las lluvias de invierno suelen ser suficientes para lavar las sales acumuladas en la rizosfera durante el período de riego.

Para el cálculo de ET_c , la FAO nos recomienda la ecuación siguiente (Doorenbos y Pruitt, 1997; Allen y col., 1998):

$$ET_c = K_c K_r ET_0 \quad ,$$

donde K_c es el coeficiente del cultivo, K_r es un coeficiente de reducción relacionado con el porcentaje de superficie de suelo cubierto por el cultivo y ET_0 (mm) es la evapotranspiración potencial, o evapotranspiración de una pradera de hierba que se usa como referencia.

1.3.1.1. Cálculo de ET_0

ET_0 es la evapotranspiración potencial de una pradera de hierba que cubre toda la superficie del suelo, saludable y bien abastecida de agua.

Para el cálculo del valor de ET_0 existen distintos métodos, algunos de ellos son:

Métodos de combinación. Se usan para estimar ET_0 a partir de datos meteorológicos. La ecuación elegida para la determinación de ET_0 debe estar validada para la zona. Hay una variedad de ecuaciones de combinación, descritas por Jensen y col., (1990) y Burman y Pochop (1994), entre otros. Las estaciones meteorológicas actuales son capaces de registrar variables suficientes para usar cualquiera de esas ecuaciones. Algunas de las ecuaciones requieren un reducido número de variables; éste es el caso de la ecuación de Hargreaves, que solo requiere datos de temperatura del aire. El método de Penman-Monteith suele ser el más adecuado para casi todos los casos.

Tanques evaporimétricos. El tipo más común es el tanque clase A del Servicio Meteorológico Americano. Su instalación y manejo se describen en Doorenbos y Pruitt (1977) y Allen y col. (1998). Con este método, ET_0 (mm) se calcula con la ecuación:

$$ET_0 = K_p E_p \quad ,$$

donde E_p (mm) es la evaporación medida en el tanque y K_p es el coeficiente del tanque. El valor de este coeficiente depende de la ubicación del tanque y de las condiciones climáticas de la zona, y puede consultarse en los manuales de la FAO citados. La principal desventaja de los tanques evaporimétricos es que tienen que ser atendidos con frecuencia.

Puede obtenerse una estimación aproximada de ET_0 dividiendo E_p por 1.24.

1.3.1.2.- El coeficiente K_c

El coeficiente de cultivo, K_c , es un coeficiente de reducción que relaciona ET_c con ET_0 ; su valor depende de variables climáticas y del cultivo considerado, entre otras variables.

Hay varias publicaciones en las que podemos encontrar el valor de K_c para olivares en España (Pastor y Orgaz, 1994; Fernández y Moreno, 1999; Orgaz y Fereres, 2001) y en otros países (Goldhamer y col., 1994). Estos valores se obtienen de forma empírica y por tanto se debe de tener cuidado cuando se vayan a usar en otras plantaciones cuyas características de cultivo y condiciones medioambientales sean distintas.

El valor de K_c también depende de la ecuación elegida para la determinación de ET_0 . En las publicaciones españolas mencionadas en el párrafo anterior, los valores de la evapotranspiración potencial se calcularon con el método de Penman-FAO, ya que Mantovani y col. (1991) establecieron que era la ecuación mas adecuada para calcular ET_0 en el Valle del Guadalquivir, zona en la que se encontraban los olivos estudiados. Gavilán y Berenjena (2000) concluyeron, sin embargo, que el método más adecuado para la zona es el de Penman-Monteith-FAO, y que el de Penman-FAO sobrestima los valores de ET_0 notablemente. Esto indica que los valores de K_c mencionados en las publicaciones anteriores resultarán bajos cuando ET_0 se calcule con Penman-Monteith. Fernández (2002) aborda esta cuestión y da los valores de K_c para el caso de que ET_0 se determine con el método de Penman-Monteith-FAO descrito en la monografía 56 de la FAO (Allen y col., 1998).

1.3.1.3.- El coeficiente K_r

Este coeficiente tiene en cuenta el estado de desarrollo del cultivo y la densidad de la plantación. Relaciona la evapotranspiración con el porcentaje de superficie de suelo cubierto por los árboles. Por definición, ET_0 es la evapotranspiración potencial de una pradera de hierba que cubre toda la superficie del suelo, saludable y bien abastecida de agua. En un olivar, parte de la superficie del

suelo no está cubierta por las copas de los árboles, y de ahí que haya que usar un segundo coeficiente de reducción, además del K_c . Aún no se han determinado valores específicos de K_r para olivar; es por ello que se usarán valores de K_r obtenidos para otras especies, como los obtenidos por Fereres y col. (1981) para el almendro:

$$K_r = (2 S_c)/100, \quad \text{siendo } S_c = (\pi D^2 N) / 400 \quad .$$

En estas ecuaciones S_c es el porcentaje de suelo sombreado por la copa de los árboles con iluminación cenital, D (m) es el diámetro medio de la copa y N es la densidad de plantación (nº de olivos/ha).

1.3.1.4.- Consideraciones del método FAO

A pesar de ser el método más usado actualmente, deben de hacerse algunas consideraciones, ya que este método introduce varios errores:

1º) Hay incertidumbres en los valores de K_c . Los valores de K_c publicados se calcularon probablemente para parcelas de características y condiciones concretas, que no siempre coinciden con las existentes en la parcela en la que necesitamos calcular ET_c , además los valores de K_c son valores medios mensuales, sin embargo, realmente K_c varía constantemente.

2º) K_r no se conoce bien en olivar, por lo que se usan valores de otros árboles frutales como el almendro, como comentamos anteriormente.

3º) Las estimaciones de ET_o se suelen hacer para un conjunto días, sin tener en cuenta las variaciones diarias. Además, su valor se calcula con los datos meteorológicos de la semana previa, con los errores que esto podría suponer si se produce un cambio significativo en las condiciones meteorológicas de una semana a otra.

4º) Aparte de las limitaciones anteriores, se pueden cometer errores al estimar P_e .

1.3.2. Modalidades de riego deficitario

Para conseguir el mayor rendimiento de un cultivo hay que mantener el suelo explorado por las raíces en torno a capacidad de campo durante toda la estación seca. Ahora bien, hay muchos casos en los que esos métodos no se pueden aplicar, ya que el agua para riego es escasa. En estos casos se puede adoptar alguna modalidad de riego deficitario.

Se denomina riego deficitario (RD) a aquél en el que se suministra una cantidad de agua inferior a las necesidades hídricas del cultivo, aunque suficiente para evitar una reducción significativa de su rendimiento. Son cuatro las modalidades de RD más usadas en la actualidad:

- *Riego deficitario sostenido*. Esta modalidad de riego se aplica en casos de riegos de alta frecuencia en los que se quiere que el cultivo use parte del agua almacenada en el suelo durante la estación de lluvias. El agua almacenada en el suelo explorado por las raíces (AA , $L\ m^{-2}$ o mm) se calcula con la ecuación

$$AA = (\theta_{cc} - \theta_{pm}) \times z_r \quad ,$$

donde θ_{cc} ($cm^3\ cm^{-3}$) es el contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo; θ_{pm} ($m^3\ m^{-3}$) es el contenido volumétrico de agua en suelo para un potencial mátrico de $-1.5\ MPa$, que consideraremos punto de marchitez; z_r (mm) es la profundidad máxima efectiva explorada por las raíces. La parte de AA , expresada en porcentaje, que puede ser agotada por la planta sin que sufra un excesivo estrés hídrico se denomina agua disponible (AD). Para muchos frutales AD oscila entre el 65 y el 75% de AA . Se parte de la base de que el estrés hídrico que sufre la planta hasta llegar a agotar AD no causa una reducción excesiva en el rendimiento del cultivo. Es por ello que se habla de déficit permisible.

No es fácil aplicar esta modalidad de riego correctamente, por la dificultad de determinar el valor de las variables involucradas. Así, el punto de marchitez varía con el

tipo de suelo y con la especie, y no siempre hay información suficiente al respecto. El valor correcto de z_r suele ser inferior a la profundidad máxima explorada por las raíces; suele hacerse coincidir con la profundidad de la capa de suelo en la que están incluidas la mayor parte de las raíces activas de la planta. El valor de AD para que no se sobrepase el déficit permisible tampoco es fácil de averiguar. Todo esto hace que este método sea bastante empírico, debiéndose, normalmente, ajustar para cada cultivo. En Orgaz y Fereres (2001), Fernández y col. (1997), d'Andria y col. (1999) y Goldhamer (1999) se dan detalles sobre la aplicación de esta modalidad de riego en el olivar.

- *Riego deficitario de baja frecuencia*. Tras el período de lluvias el suelo se encuentra próximo a capacidad de campo; al llegar la estación seca se espera a que el contenido de humedad del suelo disminuya hasta alcanzar el déficit permisible, es decir, hasta agotarse AD . Llegado ese momento, se aplica un riego abundante, hasta llevar el suelo a capacidad de campo. Hay que tener cuidado de no aplicar riegos excesivos, ya que el agua sobrante se perdería por percolación. La frecuencia de riego vendría dada por el consumo del cultivo, volumen de la rizosfera y tipo de suelo, siendo mayor en los suelos arenosos, de menor poder retentivo, que en los arcillosos.

Esta modalidad de riego se aplica sólo en los casos en los que el sistema de riego de la finca hace que resulte gravoso aumentar la frecuencia de riego. Hay plantas, como el olivo, que responden bien a esta modalidad de riego deficitario. Esto se ha puesto de manifiesto en trabajos como los de Abdel-Rahman y El-Sharkawi (1974), Lavee y col. (1990) y Pastor y Orgaz (1994). Al escaso número de riegos aplicados a lo largo de la estación seca se les llama riegos de apoyo, complementarios o suplementarios.

- *Riego deficitario controlado(RDC)*. Esta modalidad se conoce abreviadamente como RDI (*Regulated Deficit Irrigation*) en la literatura anglosajona (Chalmers y col., 1981). Consiste en reducir el riego, e incluso suprimirlo, en los momentos en los que el cultivo es menos sensible al estrés hídrico, regando con el 100% de ET_c sólo en los períodos del cultivo en los que el estrés hídrico puede ocasionar pérdidas importantes en su rendimiento. En el olivo los momentos en los que no puede faltar el agua son floración, cuajado y primeras fases del crecimiento del fruto, y a finales de la fase de crecimiento del fruto, que, en el caso de variedades de verdeo, coincide con las dos ó tres últimas semanas antes de la cosecha. Durante la mayor parte del período de

crecimiento del fruto, el olivo parece ser menos sensible a la falta de agua. El trabajo de Girona (2001) resume distintas estrategias de RDC, y da datos sobre la repuesta del olivo a esta modalidad de riego.

Con una estrategia de RDC se puede ahorrar hasta el 50 % de la cantidad de agua de riego necesaria para reponer la ET_c , sin reducciones notables de cosecha. Su dificultad radica en conocer cuáles son los momentos de mayor sensibilidad al estrés hídrico.

- *Riego parcial y alternante (PRD)*. La sigla de esta modalidad de riego proviene de su denominación inglesa, *Partial Rootzone Drying* (Dry y Loveys, 1998). En este caso se riega con menos agua de la requerida para reponer ET_c y, además, de maneja alternante en la mitad de la rizosfera realizando el cambio a la otra mitad cada 2 ó 3 semanas. Los fundamentos de esta modalidad de riego se describen en Stoll y col. (2000). Básicamente, se considera que si se aplica el agua de riego a una mitad del sistema radicular, en las raíces de la otra mitad se generan unas señales como respuesta al nivel decreciente de agua en el suelo, señales que viajan hasta la parte aérea de la planta e inducen un mayor cierre estomático, reduciendo por tanto la transpiración y aumentando la eficiencia en el uso del agua. La naturaleza de esas señales no es bien conocida, aunque se considera que hormonas vegetales como el ABA juegan un papel importante. Las señales dejan de generarse cuando el suelo se seca demasiado, de ahí que haya que volver a regar pasado un cierto tiempo, que se considera de unas dos semanas, o tres para el caso de árboles y plantas cuyo sistema radicular explore un gran volumen de suelo.

Los volúmenes totales de riego aplicados con PRD suelen ser similares a los usados con RDC, oscilando entre el 50 y el 70% de ET_c , para la mayoría de los casos. En la actualidad hay una controversia en la comunidad científica acerca de la utilidad de esta modalidad de riego, en parte generada porque los mecanismos fisiológicos involucrados en la respuesta de los cultivos al PRD no están bien establecidos (Kang y col., 2003), y en parte porque se han realizados experimentos en los que no se han visto mejores resultados con PRD que con RDC (Goldhamer y col., 2002). Hay que tener en cuenta, además, que tanto el sistema de riego requerido para la aplicación de PRD (se

suele necesitar doble sistema de tuberías portaemisores), como su manejo, es más exigente que para RDC.

Para aplicar cualquiera de las cuatro estrategias de riego mencionadas, se requiere conocer las propiedades hidráulicas del suelo de la plantación, y la respuesta de la especie en cuestión al déficit hídrico. Sólo así podremos definir con razonable exactitud los niveles de humedad en el suelo para los cuales el cultivo sufre niveles de estrés hídrico que podemos considerar dentro de un rango aceptable. Por tal entendemos aquél con el que no llegan a producirse mermas importantes en el rendimiento del cultivo.

2. Objetivos

2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en estudiar la respuesta del olivo al riego deficitario controlado (RDC) y al riego parcial y alternante de la rizosfera (*Partial Rootzone Drying*, PRD), a partir del seguimiento de variables fisiológicas y del flujo de savia en distintos órganos conductores.

Para ello se han considerado los siguientes objetivos parciales:

- Evolución del contenido de agua en suelo, en árboles de los tratamientos de secano, riego FAO (100% ET_c), riego deficitario controlado (RDC, 50% ET_c) y otro con desecación parcial y alternante del sistema radicular (PRD, 50% ET_c).

- Respuesta fisiológica de árboles representativos de los tratamientos hídricos mencionados, mediante el seguimiento, a lo largo de la estación de riego, del potencial hídrico del tronco, de la conductancia estomática y de la tasa de fotosíntesis neta.

- Evolución, a lo largo del período de riego, del flujo de savia en raíces principales, tronco y ramas de un olivo PRD y otro RDC, con objeto de determinar la influencia de la alternancia del aporte hídrico en la absorción de agua por las raíces y en el transporte en la planta.

- Evolución del área foliar en árboles regados deficitariamente, con el fin de conocer las diferencias que se pueden dar en el crecimiento de la superficie fotosintética y transpirativa en función del tratamiento de riego.

Con el desarrollo de estos objetivos se pretende esclarecer las posibles ventajas y limitaciones de las dos modalidades de riego deficitario estudiadas, así como obtener información sobre la respuesta ecofisiológica del olivo a distintos regímenes hídricos.

3. Materiales y métodos

3. Materiales y métodos

3.1. Descripción de la parcela experimental

3.1.1. Situación

El trabajo experimental de este proyecto se llevó a cabo en la finca experimental “La Hampa”, propiedad del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y adscrito al Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC). Esta finca se encuentra situada en el término municipal de Coria del Río, a unos 16 km de la ciudad de Sevilla, siendo sus coordenadas geográficas 37° 17' N, 6° 3' W, y su altitud 30 m sobre el nivel del mar.



Fotografía 3.1. Foto aérea de la finca experimental "La Hampa" en la que se observa el olivar experimental (en rojo) y la situación de la estación meteorológica (en azul)

3.1.2. Clima

El clima de la zona es descrito como templado por Mudarra (1988), típicamente mediterráneo, con veranos calurosos y secos e inviernos suaves y húmedos. La media pluviométrica es de 501 mm anuales (periodo 1971-2004) y la temperatura media anual es de 17,5 °C. La clasificación climática de Thornthwaite lo incluye dentro de los climas *Mesotérmico-seco-subhúmedo*. Según la *Soil Taxonomy*, el régimen de temperaturas es

Térmico, y el régimen de humedad del suelo es *Xérico*. El valor medio de la evapotranspiración potencial (ET_o , mm), obtenido a partir de las medidas hechas en la finca, es de 1145 mm año⁻¹ (período 1971-2002).

En la finca “La Hampa” existe una estación meteorológica estándar del Instituto Nacional de Meteorología (INM) y una estación automática (Fotografía 3.2). Con estas estaciones se realiza un seguimiento continuado de las siguientes variables meteorológicas: temperatura seca y húmeda del aire (T_a y T_w , °C), temperatura de rocío (T_d , °C), humedad relativa del aire (HR , %), número de horas de sol (n , horas), radiación solar global (R_{sg} , W m⁻²), radiación fotosintéticamente activa (PAR , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), radiación neta (R_n , W m⁻²), velocidad y dirección del viento (v , m s⁻¹; d , grados), precipitación (P , mm), y evaporación en evaporímetro de Piché (E , mm) y en tanque evaporimétrico clase A (E_{pan} , mm). En la estación automática la frecuencia de almacenamiento de datos es de media hora.



Fotografía 3.2. Estación meteorológica estándar del Instituto Nacional de Meteorología, (detalle de estación meteorológica automática)

3.1.3. Suelo

La finca experimental se encuentra situada en una zona con cierta ondulación, perteneciente al Mioceno del Aljarafe, teniendo el suelo de la parcela una pendiente entre el 3 y el 6%. La profundidad del suelo de la parcela experimental varía entre 1 y 2 m, viéndose limitada por el material original, que está constituido por areniscas calizas. Siguiendo la *Soil Taxonomy* (USDA, 1975), el suelo se clasifica como *Xerocrept*. Su clasificación edafológica completa puede verse en Moreno y col. (1983).

El suelo de la plantación es de textura franco arenosa, la densidad aparente media en los 10 primeros centímetros es de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ y entre 10 y 20 cm de $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$. El contenido volumétrico de agua es $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a capacidad de campo (aunque en las medidas *in situ* rara vez se registran valores superiores a $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para -1.5 MPa ; la conductividad hidráulica en un rango cercano a saturación es $0,01\text{-}0,03 \text{ mm s}^{-1}$ en la superficie del suelo y $0,007\text{-}0,015 \text{ mm s}^{-1}$ en la suela de labor, a unos 0,2 m de profundidad (Palomo M.J y col., 2002).

En cuanto a sus características químicas, el suelo es pobre en materia orgánica (0,6%), y presenta contenidos de fósforo (10 ppm Olsen) y potasio (185 ppm) normales para la zona. El agua que se emplea para el riego procede de un pozo situado en la finca, y tiene una conductividad eléctrica media de 2.45 dS m^{-1} , por lo que presenta un problema de salinidad moderado; el contenido medio de cloruro es de 468 g m^{-3} lo que provocaría problemas de toxicidad en caso de riego superficial o por aspersión, pero que permite su uso para el riego localizado por goteo. Los datos comentados corresponden a un análisis hecho al principio de la época de riego del año experimental.

3.1.4. Parcela experimental

La parcela objeto de estudio tiene una extensión de 0.5 ha. En ella hay plantados olivos de la variedad “Manzanilla de Sevilla” (en adelante “Manzanilla”). Los árboles, en el momento del estudio, tenían 36 años de edad. El marco de plantación es de 7 m x 5 m (286 plantas por hectáreas) y los árboles están formados a un solo pie y con dos ramas principales a una altura de 0,8-1,5 m.

La parcela está dotada con un sistema de riego localizado por goteo que suministra agua a los distintos tratamientos hídricos objeto de estudio.

3.2. Manejo del cultivo

3.2.1 Labores de cultivo y tratamientos fitosanitarios

Las labores de cultivo que se han llevado a cabo en la parcela experimental son las que tradicionalmente se realizan en las plantaciones de olivar “Manzanilla” de la zona. Se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3.1. Operaciones y labores de cultivo realizadas en la parcela durante el período experimental.

04/01/2004	Tratamiento contra repilo (<i>Cycloconium oleaginum</i>) Producto empleado: Caldo Bordelés 25 valles m.a.: Sulfato cuprocálcico 25% (expresado en Cu) p/p. Dosis 0,50%-0,75%
29/01/2004	Pase cruzado con el conculder
09/02/2004	Realización de la poda
17/02/2004	Tratamiento contra repilo (<i>Cycloconium oleaginum</i>) Producto empleado: Caldo Bordelés 25 valles m.a.: Sulfato cuprocálcico 25% (expresado en Cu) p/p. Dosis 0,50%-0,75%
03/03/2004	Tratamiento herbicida de contacto con mochila Producto empleado: Spasor Plus-Monsanto m.a.: Glifosato 36%. Dosis 3 l ha ⁻¹
14/04/2004	Pase cruzado con el conculder
17/05/2004	Tratamiento herbicida de contacto con mochila Producto empleado: Spasor Plus-Monsanto m.a.: Glifosato 36%. Dosis 3 l ha ⁻¹
14/06/2004	Tratamiento contra la mosca del olivo (<i>Bractocera oleae</i>), Prays 2ª generación (<i>Prays oleae</i>) Producto empleado: Triclorfon 80 P.S CAG m.a.: triclorfon 80% p/p Dosis: 0,4%-0,5%. P.S: 10 días
05/07/2004	Tratamiento herbicida de contacto con mochila Producto empleado: Spasor Plus-Monsanto m.a.: Glifosato 36%. Dosis 3 l ha ⁻¹
18/08/2004	Tratamiento contra la mosca del olivo (<i>Bractocera oleae</i>), Prays 2ª generación (<i>Prays oleae</i>) Producto empleado: Triclorfon 80 P.S CAG m.a.: triclorfon 80% p/p Dosis: 0,4%-0,5%. P.S: 10 días

3.2.2. Tratamientos hídricos

Se establecieron en la parcela experimental cuatro zonas de estudio, cada una de ellas con un tratamiento hídrico (diferentes dosis y frecuencia de riego).

El agua de riego se bombeó desde un pozo situado en la finca hasta ocho depósitos junto al cabezal de riego. De ellos parte una tubería que llega hasta el interior de una caseta junto al cabezal de riego, donde se encuentra un tanque para el fertilizante con bomba agitadora y bomba inyectora, una bomba de riego, un filtro de anillas, una tubería primaria para cada tratamiento, dotada de un contador y una electroválvula. Todo el sistema se acciona mediante un programador de riego (Progres S.A., mod. Agronic 2000), que permite el uso de cuatro programas de fertirriego distintos.

Los tratamientos hídricos aplicados fueron los siguientes:

- Secano (S): los árboles recibieron el agua de lluvia como único aporte hídrico.
- FAO o tratamiento de control: en este tratamiento la dosis de riego es calculada según las recomendaciones de la FAO (Allen y col., 1998). Para ello se usó la ecuación $ET_c = K_c K_r ET_o$, aplicando los coeficientes que sabemos adecuados para la zona (Fernández, 2002).
- Riego deficitario controlado o RDC: este tratamiento hídrico consistió en reducir el riego, e incluso suprimirlo, en los momentos en los que el cultivo es menos sensible al estrés hídrico; en los momentos en los que es más sensible, se aplicó un riego suficiente para cubrir las necesidades del cultivo, es decir, se regó con el 100% de ET_c .

En nuestro caso, estimamos que la cantidad aportada en todo el período de riego fue del 50% de la cantidad aportada con el tratamiento FAO.

- Riego parcial y alternante o PRD: con este tratamiento hídrico se regó únicamente una mitad de la rizosfera durante 3 semanas, regándose a continuación la otra mitad por el mismo tiempo, y así sucesivamente durante todo el período de riego. Se aplicaron volúmenes similares a los aportados con el tratamiento RDC.

La parcela se dividió en cuatro sectores de aproximadamente igual superficie, como puede verse en la siguiente figura:

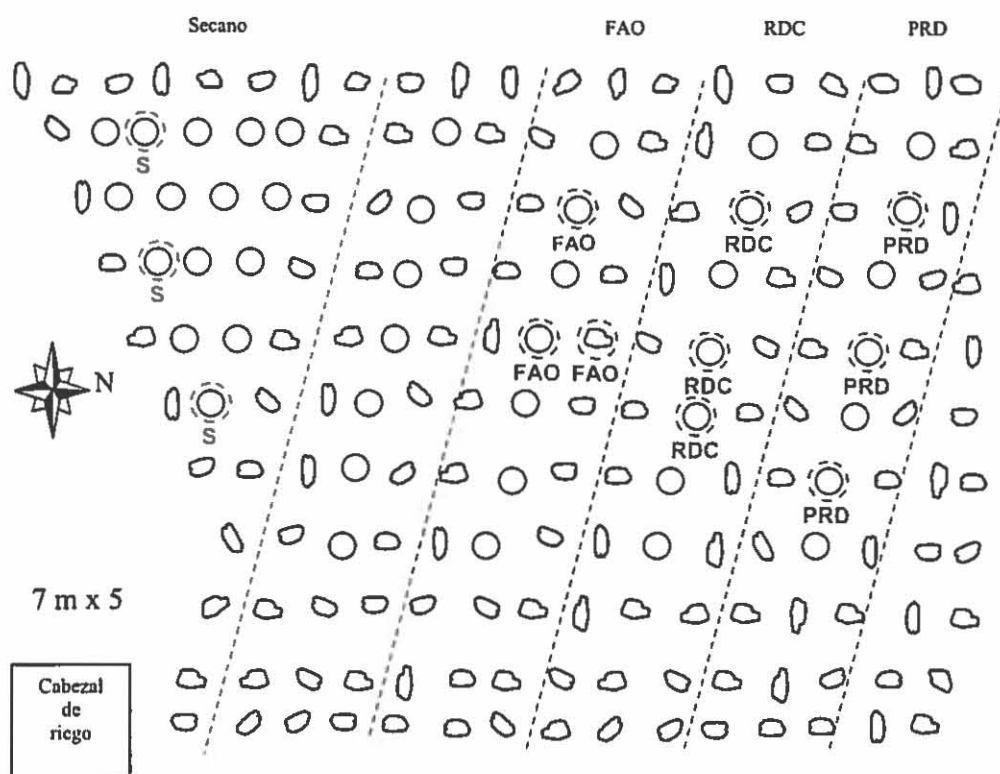


Figura 3.1. Croquis de la parcela experimental en “La Hampa”. Se muestran los cuatro tratamientos hídricos que se practicaron. Se han marcado los árboles en los que se hicieron las medidas experimentales

En los tratamientos FAO y RDC, el sistema de riego consistió en una tubería portagoteros por fila de árboles, con cinco goteros autocompensantes de 3 L h^{-1} por árbol, separados entre sí 1 m, estando el central situado a la altura del tronco. En el tratamiento PRD se usaron dos tuberías portagoteros por fila de árboles; una de ellas regaba durante veintiún días la parte “este” de la rizosfera, mientras que la parte “oeste” se regaba con la otra tubería los siguientes veintiún días. Cada tubería tenía tres goteros por árbol, del mismo tipo que los de los otros tratamientos, y situados a 0.8, 1.4, y 2.0 m del tronco.

El valor de K_r se calculó según Fereres y col. (1981), teniendo en cuenta que en la plantación experimental, con árboles a 7 m x 5 m y con un diámetro de copa medio de 3.9 m, el porcentaje de suelo sombreado por la copa fue del 35%. Con estas características, el valor resultante fue $K_r = 0.7$. El valor de K_c que se aplicó es el determinado por Fernández (2002) en la parcela experimental (0,88 en marzo; 0,84 en abril; 0,76 en mayo; 0,70 en junio; 0,63 en julio y agosto; 0,72 en septiembre y 0,77 en octubre). Las dosis de riego se calcularon con periodicidad semanal, usando en cada ocasión los datos meteorológicos de la semana anterior para el cálculo de ET_o .

La cantidad de agua que recibió cada uno de los tratamientos, así como los períodos durante los que se aplicaron, fueron:

En el tratamiento FAO se regó con el 100% de ET_c desde mayo hasta octubre.

Según Girona (2001), con el riego RDC se evita que el árbol sufra estrés hídrico en los momentos críticos de su ciclo. El árbol no debe sufrir estrés hídrico en la primera fase del endurecimiento del hueso, que en el año experimental ocurrió entre finales de mayo y principios de junio. Después pueden reducirse las dosis de riego, hasta finales del crecimiento del fruto, que ocurre sobre mediados de agosto (si la aceituna fuese para almazara podría retrasarse la reanudación del riego normal hasta justo antes del inicio del cambio de color). A partir de esta fecha el árbol no debe sufrir estrés hídrico, para que el fruto llegue a su tamaño normal. En cualquier momento del ciclo anual se deben evitar déficits importantes durante largos períodos de tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior, se estableció el siguiente calendario de riegos:

% ET_c aplicado	Período
100 %	Desde 25 de mayo hasta 14 de junio (3 semanas)
30 %	Desde 15 de junio hasta 12 septiembre (13 semanas)
100 %	Desde 13 septiembre hasta 17 octubre (5 semanas)

La dosis total aportada en el tratamiento RDC fue el 56,67 % de ET_c . Como el riego fue diario, las pérdidas por evaporación desde la superficie del suelo se pudieron considerar casi iguales que las del tratamiento FAO, por lo que la cantidad de agua

disponible para ser absorbida por las raíces en el tratamiento RDC pudo aproximarse al 50 % de la cantidad disponible en el tratamiento FAO.

Se comenzó el riego PRD el 15 de Junio (DDA 167), regándose la parte de la rizosfera orientada al oeste. El desarrollo del riego se esquematiza en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Calendario de riego en el tratamiento hídrico PRD

Periodo de tiempo	Zona regada
Desde el 15 de Junio hasta el 3 de Julio	Oeste
Desde el 4 de Julio hasta el 25 de Julio	Este
Desde el 26 de Julio hasta el 16 de Agosto	Oeste
Desde el 17 de Agosto hasta el 5 de Septiembre	Este
Desde el 6 de Septiembre hasta el 12 de Septiembre	Oeste

3.2.3. Fertilización

Todos los tratamientos hídricos recibieron fertilización, para evitar así la posible interferencia que supondría cualquier déficit nutricional en el olivo. Cada árbol recibió 0,6 kg de N y 0,25 kg de K y P repartidos durante la época de riego. Los fertilizantes aportados contenían además cantidades de Fe, B y otros elementos necesarios para el crecimiento del cultivo (Fernández-Escobar, 2001).



Fotografía 3.3. Tanque de fertilización (izquierda), inyector de fertilizante (centro) y controlador electrónico de riego (derecha)

Los árboles regados recibieron los fertilizantes junto al agua, a través de del sistema de riego, seis días en semana durante todo el periodo de riego. Los árboles de secano recibieron dos aplicaciones de fertilizantes, que se hicieron a mediados de febrero y a principios de junio, en ambas aplicaciones los fertilizantes fueron distribuidos bajo la copa de los árboles.



Fotografía 3.4. Detalle de la disposición del sistema de riego en la parcela experimental

3.3. Respuesta del cultivo a los tratamientos hídricos

3.3.1. Evolución del agua en el suelo

Para la medida del contenido volumétrico de agua en el suelo se utilizó el método de moderación de neutrones, mediante el empleo de una sonda de neutrones modelo Troxler 3333 (Research Triangle Park, North Carolina, USA). Para ello se instalaron tubos de acceso para la sonda en el suelo de tres árboles representativos de cada tratamiento, a 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 m del tronco, y en la dirección de la tubería portagotos, la disposición de los tubos de acceso se muestra en la Figura 3.3. Con

estos tubos se exploró toda la capa de suelo colonizada por las raíces, de profundidad variable entre 1 y 2 m, según la zona de la parcela. El funcionamiento de la sonda se basa en la emisión de neutrones que chocan con átomos de un tamaño similar a los de hidrógeno, perdiendo energía (moderación de los neutrones) y cambiando de dirección. El aparato consta también de un captador de neutrones lentos o moderados, de manera que, a mayor número de neutrones captados, mayor número de moléculas de agua presentes en el suelo. Este número se transforma posteriormente en contenido volumétrico de agua en suelo (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), mediante una curva de calibrado obtenida en la parcela. En nuestro caso usamos la curva obtenida por Palomo (2000). En la Figura 3.2 se muestra la curva de calibrado.

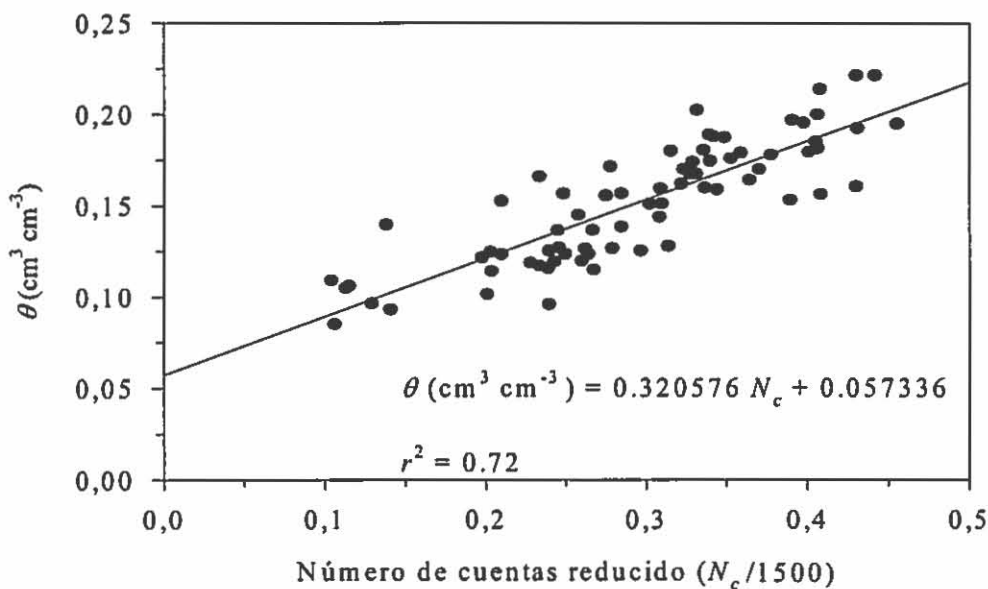


Figura 3.2. Curva de calibrado de la sonda de neutrones para el suelo de la parcela experimental, obtenida tras comparación de medidas de la sonda con datos gravimétricos.

La sonda de neutrones no puede usarse para medir a menos de 20 cm de la superficie del suelo. Por ello, para determinar θ en la capa de 0-20 cm usamos el método gravimétrico y los valores de densidad aparente.

La periodicidad de las medidas fue semanal para los tratamientos PRD y RDC y quincenal para FAO y Secano.



Fotografía 3.5. Tubos de acceso para la sonda de neutrones (derecha). Sonda de neutrones Troxler 3333 (izquierda)

A partir de los valores de θ calculamos el contenido relativo de agua en suelo (CRA) definido por la ecuación de Granier (1987):

$$CRA = (R - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) \quad ,$$

donde R (mm) es el contenido de agua en el suelo en el momento para el cual se quiere calcular CRA, R_{\min} (mm) es el contenido mínimo de agua medido en el suelo de la parcela (218,4 mm) y R_{\max} (mm) es el contenido máximo de agua (384,6 mm).

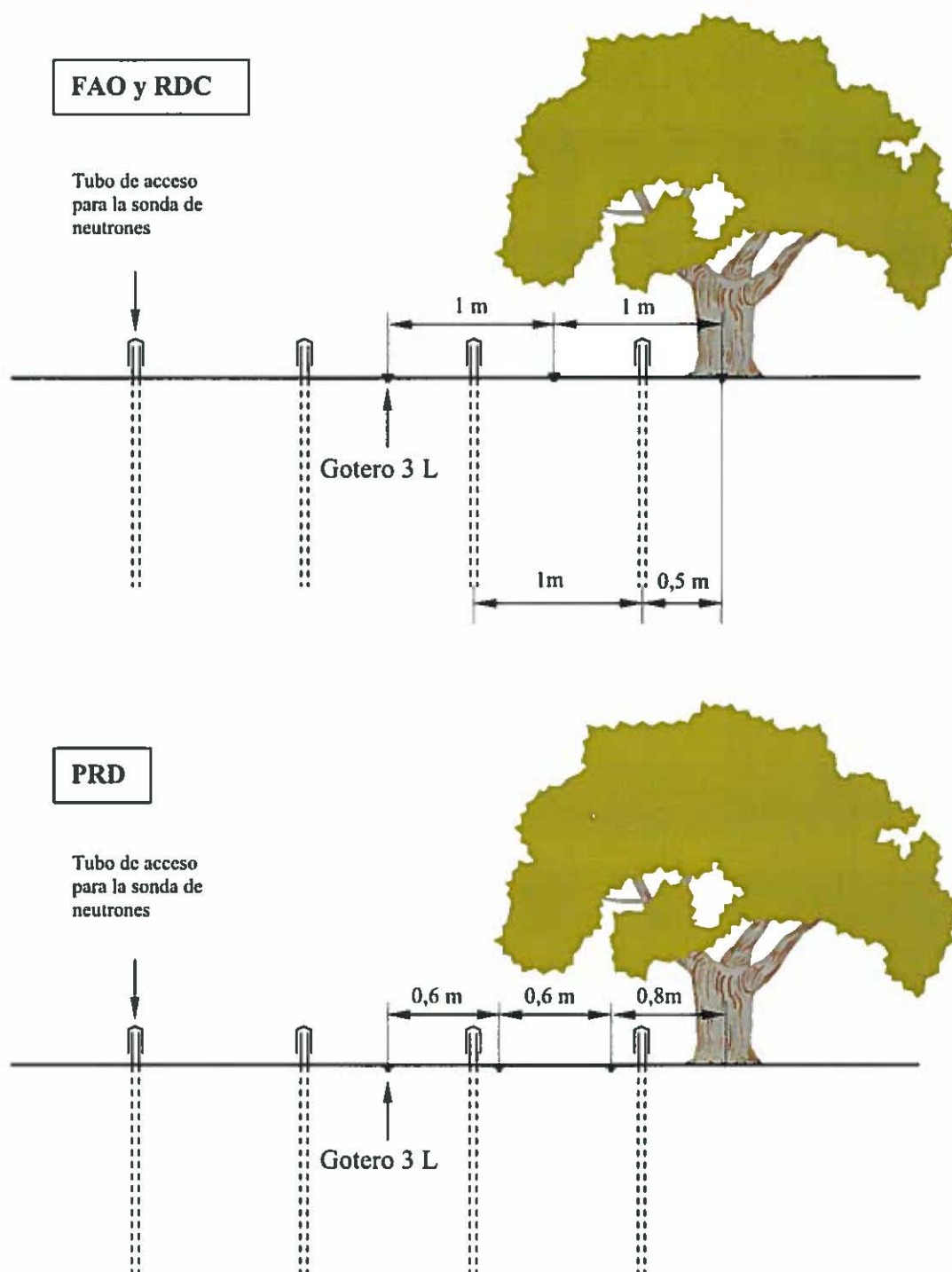


Figura 3.3. Disposición de los goteros y de los tubos de acceso para la sonda de neutrones.

3.3.2. Crecimiento de ramos

Para comparar las posibles diferencias en el desarrollo de los árboles sometidos a distintos tratamientos, se realizaron medidas de longitud de ramos durante todo el periodo de crecimiento, en diez árboles por tratamiento y en dos ramos por árbol, uno orientado al este y otro al oeste. Las medidas de crecimiento se hicieron semanalmente, desde el comienzo de la brotación, haciéndose la primera lectura el día 8 de marzo, hasta que los ramos alcanzaron su máxima longitud al final del periodo vegetativo, siendo la última lectura el 2 agosto.

3.3.3. Estado fenológico

El estudio del estado fenológico se realizó con la finalidad de detectar posibles diferencias en la evolución de los estados vegetativos entre árboles pertenecientes a distintos tratamientos hídricos. Se determinó el estado fenológico de los olivos con una periodicidad semanal, tomándose para cada tratamiento el estado más atrasado, el más adelantado y el más frecuente, adoptándose el criterio propuesto por Colbrant y Fabre en 1975 para el olivo, que puede encontrarse en Loussert y Brousse (1978).

La nomenclatura usada para los distintos estados fenológicos fue la siguiente:

A = reposo invernal

B = comienzo del crecimiento

C = formación de los racimos florales

D = engrosamiento de los botones florales

E = diferenciación de la corola

F = comienzo de la floración

F¹ = floración

G = caída de pétalos

H = aparición del fruto

I = engrosamiento del fruto

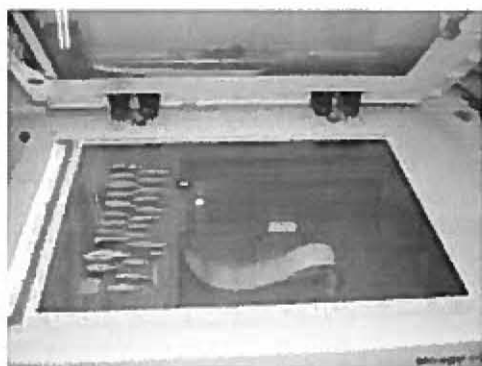
I¹ = frutos de 8-10 mm y endurecimiento del hueso

3.3.4. Evolución del área foliar en árboles regados deficitariamente.

El 25 de marzo se determinó el área foliar total de tres árboles del tratamiento RDC y tres del tratamiento PRD, con el fin de conocer posibles diferencias en función del tratamiento hídrico.

El procedimiento seguido para la obtención del área foliar (AF) fue el siguiente:

- 1-. División de la copa del árbol en 5 ó 6 partes.
- 2-. Conteo de las hojas de una de esas partes.
- 3-. Toma de una muestra de 150-200 hojas y determinación de su AF total mediante escaneo y procesamiento de las imágenes con el programa “midebmp.exe” desarrollado por Ramón Ordiales Plaza (EEZA-CSIC).
- 4-. Obtención del AF del sector del árbol a partir del área medida de las hojas y el número de las hojas del sector.
- 5-. Cálculo del AF total teniendo en cuenta el número de partes establecidas en el árbol.



Fotografía 3.6. Proceso de escaneo de hojas

Para la determinación de la evolución de AF a lo largo del período de riego, se realizó un seguimiento del AF de 20 ramos por árbol. El 25 de marzo se contaron las hojas nuevas y viejas en los ramos marcados y se tomaron otras medidas de crecimiento tales como longitud, diámetro basal y número de frutos.

Estas medidas se repitieron en las siguientes fechas: 2 de junio, 1 de julio, 4 de agosto y 15 de Septiembre, en estos controles se realizaron muestreos de cinco ramos por árbol para conseguir determinar el área foliar. En las tres primeras medidas se realizó el estudio sobre ramos análogos a los ramos marcados, intentando encontrar semejanzas en vigor, posición que ocupa en el árbol, tamaño, presencia o no de frutos, etc. En la última medida se tomaron los ramos marcados ya que no se iba a continuar con el estudio de la evolución de los mismos.

3.3.5. Potencial hídrico del tronco

Se determinó el potencial hídrico (Ψ , MPa) en árboles de los cuatro tratamientos con una cámara (*Soilmoisture Equipment Corp.*, Santa Bárbara, CA, USA) siguiendo el procedimiento descrito por Scholander y col. (1965) y teniendo en cuenta las recomendaciones de Turner (1981).



Fotografía 3.7. Detalle de hoja envuelta en papel de aluminio

Las medidas se realizaron en hojas basales de ramos que crecían en el tronco y ramas principales, en dos hojas por árbol y tres árboles por tratamiento. Las hojas se envolvieron en papel de aluminio (Fotografía 3.7.), para evitar la transpiración, unas 2 horas antes de la medida, tiempo suficiente para que su potencial se igualase con el del tronco (Melcher y col., 1998), evitando de esta manera que las hojas siguieran transpirando.



Fotografía 3.8. Proceso de medida del potencial hídrico (izquierda). Cámara o bomba de presión (derecha)

3.3.6. Intercambio gaseoso de las hojas

3.3.6.1. Conductancia estomática

Para la determinación de la conductancia estomática (g_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) utilizamos un equipo Licor LI-6400 (LI-6400, Li-cor, Inc., Lincoln, NE, USA) (Fotografía 3.9) Éste dispone de un analizador de gases en el infrarrojo para medir las presiones parciales de H_2O en el aire exterior (denominado de referencia) y el aire después de pasar por la cámara donde se encuentra la hoja (denominado de muestra). La diferencia entre ambas medidas se debe a la transpiración. El LI-6400 utiliza el “modo abierto” para medir H_2O . Este método consiste en que el aire se expulsa al exterior una vez que entra en la cámara y ha sido analizado. Esto es una ventaja frente al “modo cerrado”, en el que el aire se recicla y lo que se mide es la bajada en la concentración de H_2O tras pasar por la cámara. El sistema abierto exige que se conozca con precisión el flujo de aire que entra en la cámara para poder calcular la tasa de intercambio por unidad de tiempo. Conociendo la diferencia entre las presiones parciales de H_2O de referencia y

de la muestra, el flujo y el área de hoja encerrada en la cámara, se puede calcular la tasa de transpiración.

La conductancia estomática la calcula el LI-6400 a partir de la transpiración, y de la diferencia entre el déficit de presión de vapor (D_a , kPa) del interior de la hoja y del exterior en la cámara. El del interior se determina a partir de la temperatura de la hoja, que se mide con un termopar, y asumiendo que el espacio intersticial de la hoja está saturado de vapor de agua.

Las medidas de conductancia estomática y fotosíntesis neta se realizaron simultáneamente a las de Ψ_{tronco} , en dos hojas por árbol y tres árboles por tratamiento. Se seleccionaron hojas del año, totalmente desarrolladas, sanas, en la parte de la copa orientada al sol y entre 1 y 2 m de altura. Se eligió normalmente de la cuarta a la sexta hoja desde el ápice. En cada medida se determinó el área de la hoja encerrada en la cámara, mediante un programa de análisis de área foliar.

3.6.6.2. Fotosíntesis neta

Para la determinación de la fotosíntesis neta (P_N , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), también se utilizó el equipo Licor LI-6400 (LI-6400, Li-cor, Inc., Lincoln, NE, USA). Éste dispone de un analizador de gases en el infrarrojo para medir las presiones parciales de CO_2 en el aire exterior (denominado de referencia) y el aire después de pasar por la cámara donde se encuentra la hoja (denominado de muestra). La diferencia entre ambas medidas de CO_2 se debe a la fotosíntesis. Para esta medida también se utiliza el “modo abierto” para medir CO_2 . Conociendo la diferencia entre las presiones parciales de CO_2 de referencia y de la muestra, el flujo y el área de hoja encerrada en la cámara, se puede calcular la tasa de fotosíntesis.

Las medidas de g_s y P_N se realizaron simultáneamente a las de Ψ_{tronco} , en dos hojas por árbol y tres árboles por tratamiento. Se seleccionaron hojas del año, totalmente desarrolladas, sanas, en la parte de la copa orientada al sol y entre 1 y 2 m de altura. Se eligió normalmente de la cuarta a la sexta hoja desde el ápice. En cada

medida se determinó el área de la hoja encerrada en la cámara, mediante un programa de análisis de área foliar.



Fotografía 3.9. Pinza del LI-6400, donde se encuentran los analizadores de gases (izquierda) y su consola (derecha).

3.3.7. Cuantificación del consumo hídrico en los árboles regados deficitariamente

Para cuantificar el consumo hídrico se determinó el flujo de savia en los árboles regados deficitariamente, con el método de compensación de pulso de calor (CPC) (Swanson y Whitfield, 1981; Swanson, 1994). Este sistema utiliza dos agujas de teflón con sensores de temperatura y una aguja metálica calefactora. Todas ellas se insertan radialmente en el xilema del órgano (tallo, rama o raíz) de la planta en la que se le quiere medir el flujo de savia. Al conjunto de estos tres elementos se le denomina sonda CPC.

Las agujas con los sensores de temperatura se sitúan asimétricamente arriba y abajo de la aguja calefactora, de forma que la de aguas arriba está a 5 mm de la aguja calefactora y la de aguas abajo a 10 mm. Las agujas tenían un diámetro de 1.8 mm. Cada aguja tenía cuatro sensores de temperatura termopares de cobre-constantán de forma que podíamos determinar la velocidad de la savia a diferentes profundidades a partir del cambium (5, 12, 21 y 35 mm).



Fotografía 3.10. Detalle del sistema para medir flujo de savia: aguja calefactora insertada en el centro de dos agujas portadoras de los sensores de temperatura.

Las agujas (la calentadora y las portadoras de los termopares) se conectaron a un *data logger* Campbell CR10X (*Campbell Scientific Inc.*, U.S.A.), en el que se almacenaba la información que después era transmitida al ordenador, y que controlaba la emisión del pulso de calor. El sistema se alimentaba con una batería de 12 V y 92 A. Todos los sensores, la electrónica asociada, así como el programa necesario para el funcionamiento del sistema y para calcular el flujo de savia a partir de las medidas de velocidad de pulso de calor se adquirieron en el *Environment and Risk Management Group* del *Hort+Research Insitute* en Palmerston North, Nueva Zelanda (Green, 1998).

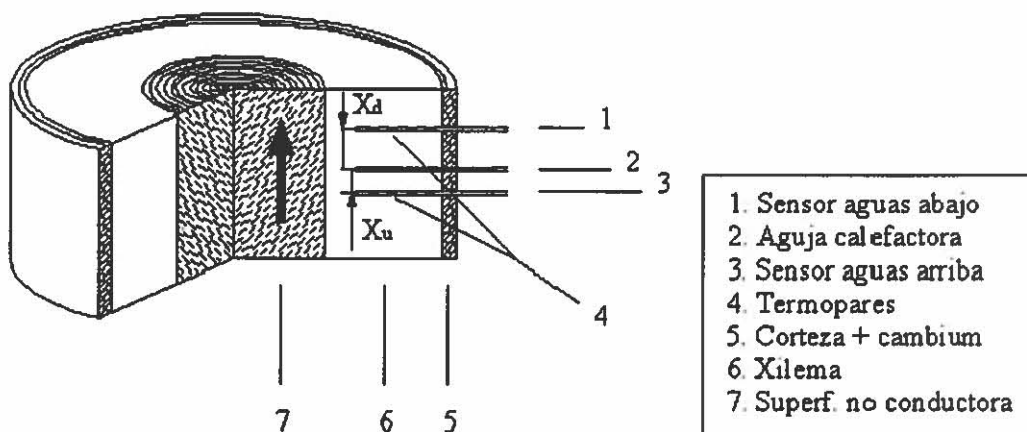


Figura 3.4. Esquema de la instalación de las sondas de temperatura y aguja calefactora usadas en la técnica de compensación de pulso de calor para estimar el flujo de savia que circula por un tronco. X_d = distancia aguas arriba de la aguja calefactora. X_u = distancia aguas abajo de la aguja calefactora.

Una vez emitido el pulso de calor (de 1 s de duración en nuestro caso, que se emitía cada media hora), el aumento de temperatura era registrado primero por los

sensores situados aguas arriba, debido a la conducción. Poco más tarde, el calor transportado por la savia calienta los sensores aguas abajo. A partir de un tiempo determinado, denominado tiempo de cruce (t_z), la temperatura de los dos sensores se iguala (Swanson, 1962). Este tiempo depende de la velocidad con la que circula la savia, y es el tiempo requerido para que el calor transportado mediante convección por la corriente de savia modifique la situación del “pico” del pulso de calor desde la aguja calefactora hasta el punto medio entre los sensores de temperatura, de forma que t_z disminuye cuando la velocidad de savia aumenta. La velocidad de propagación del pulso de calor V (m s^{-1}) viene dada por (Swanson y Whitfield, 1981):

$$V = (x_d - x_u) / 2t_z \quad ,$$

donde x_d y x_u (m) son las distancias entre la aguja calefactora y los sensores aguas abajo y aguas arriba, respectivamente.

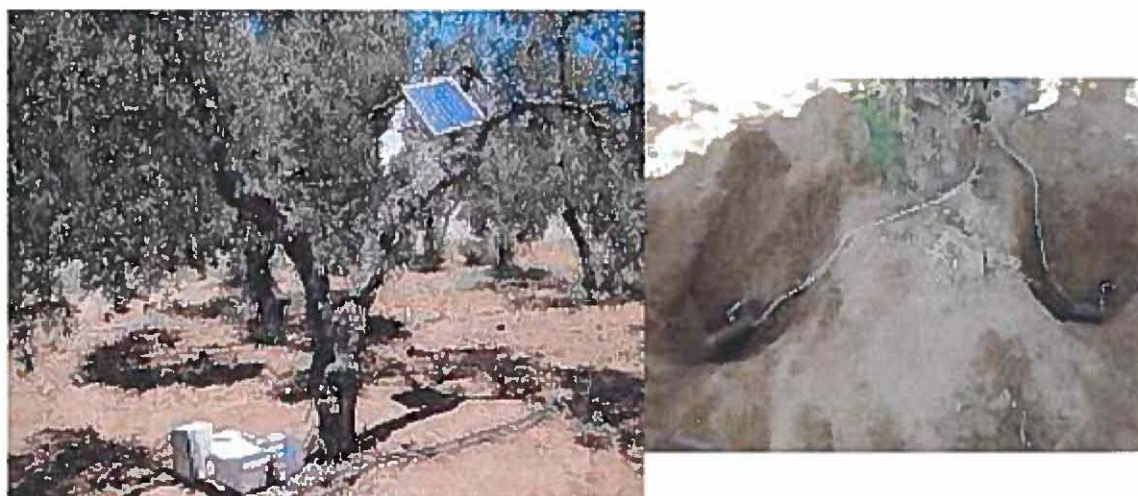
Una vez calculada V , es necesario calcular unos coeficientes para corregir la influencia de haber insertado las sondas en el órgano conductor. De esta forma, se obtiene una velocidad corregida V_c (m s^{-1}) que viene dada por:

$$V_c = a + bV + cV^2 + dV^3 \quad ,$$

siendo a , b , c , y d los coeficientes de corrección. La calibración de este método para olivos adultos variedad “Manzanilla” fue llevada a cabo por Palomo y col., 2000.

En este ensayo se se insataron sondas CPC en ramas principales, troncos y raíces principales (alrededor de 0.04 m de diametro) de tres olivos RDC y tres olivos PRD.

En los árboles PRD se instalaron tres sondas CPC (rama principal, tronco y raíz principal) en cada una de las caras afectadas por el riego, es decir, en la cara este y en la cara oeste (Fotografía 3.11 y Figura 3.5).



Fotografía 3.11. Árbol con instalación de sondas CPC (izquierda). Detalle de las sondas CPC en raíces (derecha).

El sistema se mantuvo en funcionamiento desde el 12 de mayo al 15 de septiembre.

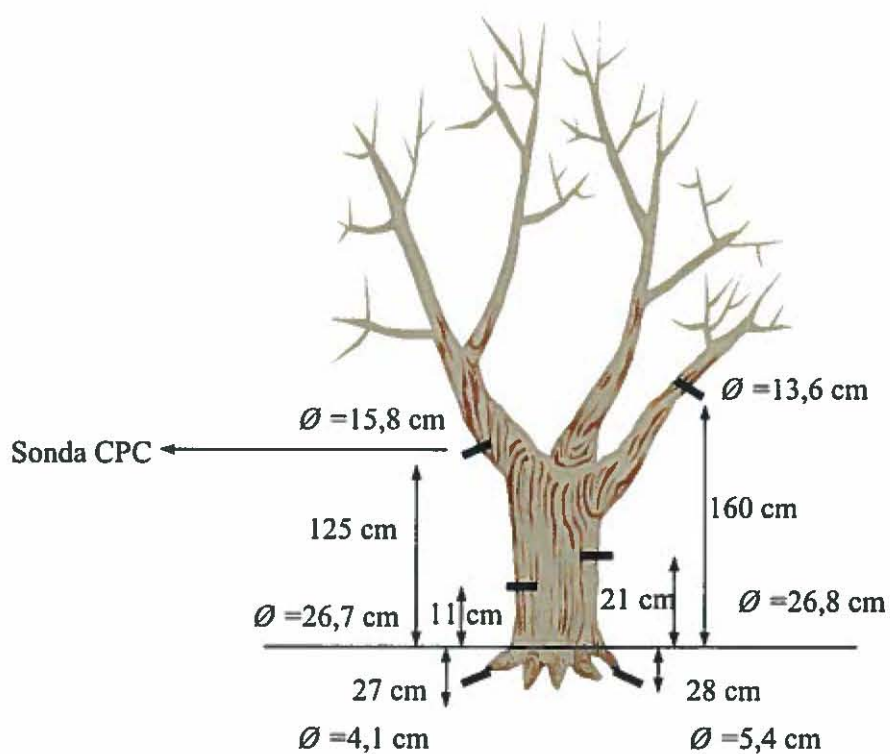


Figura 3.5. Esquema de disposición de sondas CPC y diámetros de raíces, tronco y ramas en árboles PRD

4. Resultados y discusión

4. Resultados y discusión

4.1. Condiciones meteorológicas

Los datos meteorológicos obtenidos en la parcela experimental durante el año en que se realizó el estudio (2004) se representan en la Figura 4.1.

En el año 2004 fue se registraron 476 mm de lluvia, dato similar a los 501 mm de media anual que se registran en la zona (periodo 1976-2004). Las lluvias se repartieron principalmente en primavera y otoño, lo cual es típico en la zona. Una particularidad de este año, sin embargo, fueron las lluvias que se registraron desde enero a principios de junio que, aunque no fueron especialmente cuantiosas en comparación con las registradas otros años, estuvieron homogéneamente distribuidas a lo largo de todo ese periodo, inclusive en mayo y primeros días de junio, un periodo este habitualmente seco en la zona.

En cuanto a la temperatura, cabe destacar que fue un verano muy caluroso, con máximas por encima de 35 °C desde finales de mayo hasta finales de septiembre; el mes más caluroso fue julio, como es habitual en la zona, contando con temperaturas superiores a 40 °C. El invierno fue suave y húmedo, también típico de la zona.

4.2. Respuestas del cultivo a los tratamientos hídricos

4.2.1. Evolución del agua en el suelo

La evolución de los aportes hídricos realizados mediante el riego en los distintos tratamientos se muestra en la Figura 4.2. También se muestran los valores de ET_o y de la evapotranspiración del cultivo (ET_c , mm), calculados según el método del coeficiente de cultivo descrito por la FAO.

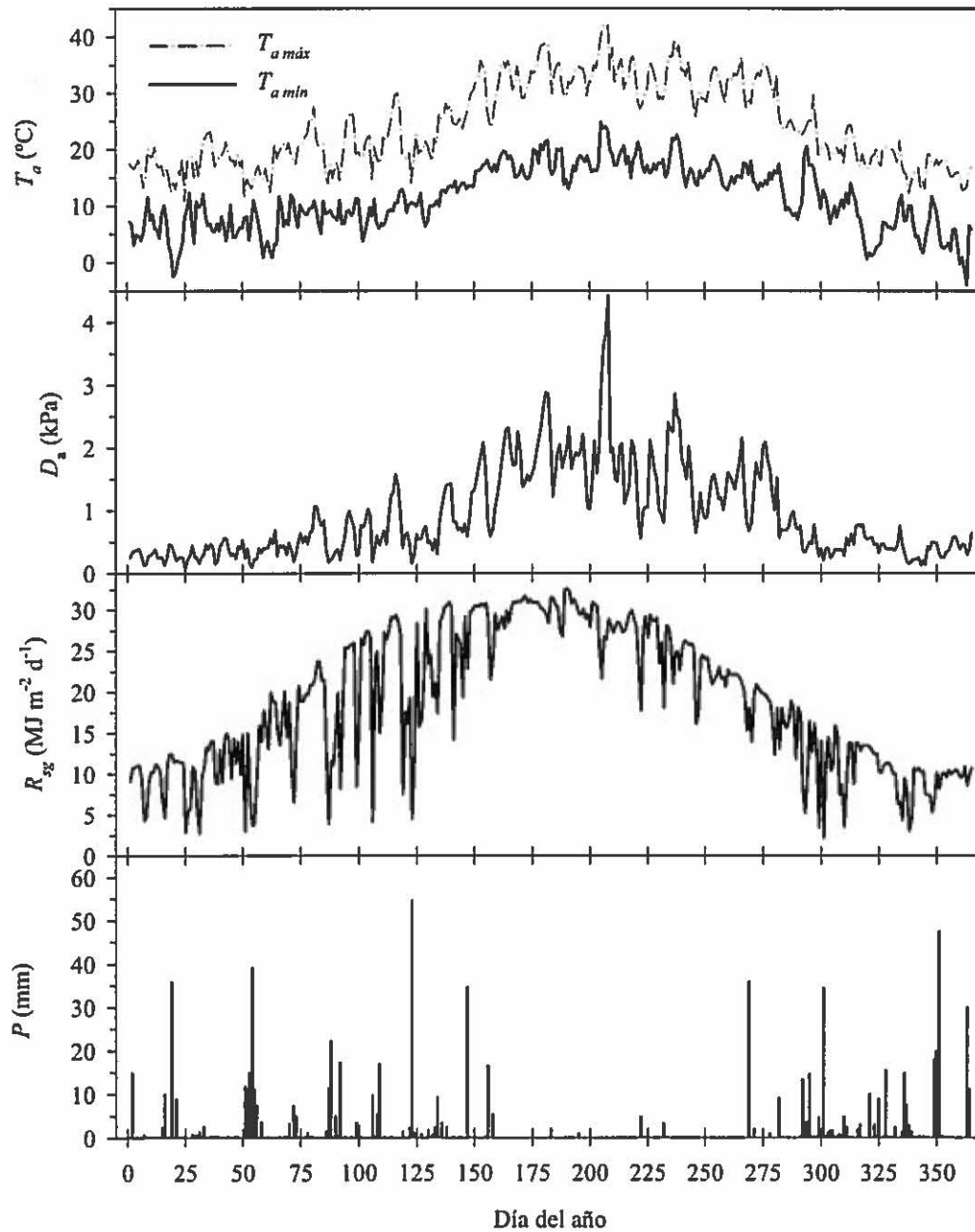


Figura 4.1. Evolución de las variables meteorológicas más significativas a lo largo del año experimental (2004). T_a = temperatura del aire; D_a = déficit de presión de vapor del aire; R_{sg} = radiación solar global; P = precipitación.

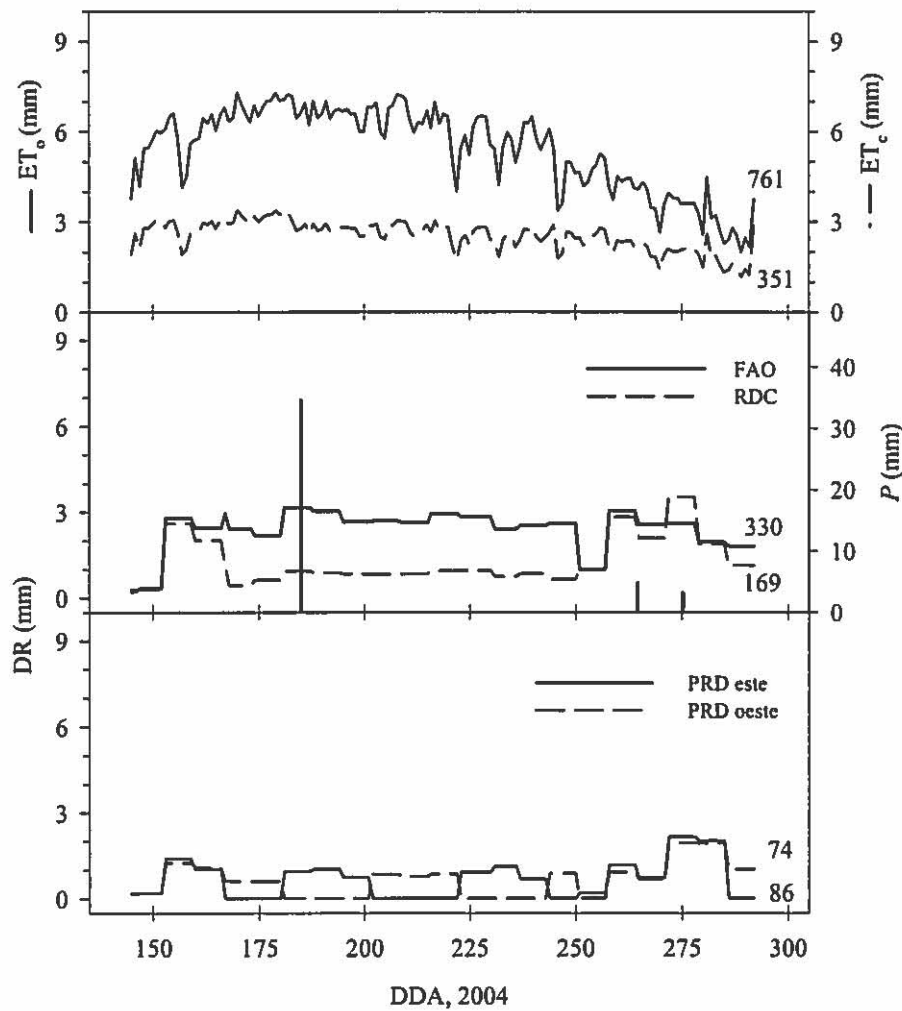


Figura 4.2. Dosis de riego (DR) aplicadas a los olivos en los cuatro tratamientos hídricos considerados (ver texto para descripción de los tratamientos). Los números al final de las líneas indican el aporte total de agua aplicado en cada tratamiento, durante todo el periodo de riego. También se muestran los valores de la evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm) y del cultivo (ET_c , mm), para el periodo estudiado. Los aportes por precipitación (P) se muestran en la gráfica central. Las datos de ET_0 se calcularon a partir de los datos meteorológicos obtenidos en la estación meteorológica de la finca, usando la ecuación de Penman-Monteith descrita en la monografía n.º 56 de la FAO

Los datos de la figura 4.2 indican que los aportes hídricos realizados en los tratamientos deficitarios RDC y PRD estuvieron próximos al 50 % de las necesidades totales del cultivo, es decir, de lo aportado con el tratamiento FAO (Goldhamer y col., 1999; Girona, 2001). Esto demuestra el correcto manejo del riego en la parcela experimental.

Los resultados de las medidas de agua en el suelo que se hicieron a lo largo del periodo de estudio, se muestran en la figura 4.3. Los datos de esta figura corresponden a los valores de contenido relativo de agua que se calcularon a partir de los datos de contenido volumétrico de agua en suelo determinados con los métodos de moderación de neutrones y gravimétrico.

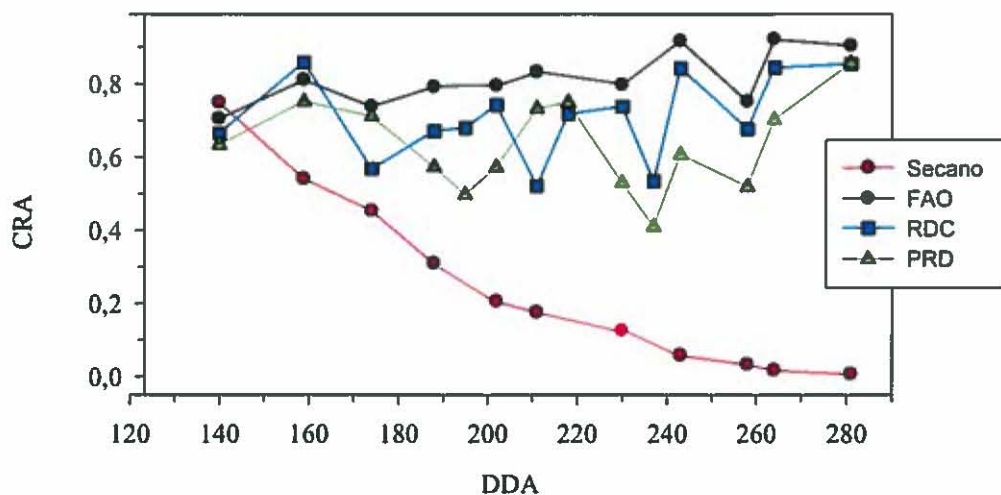


Figura 4.3. Evolución del contenido relativo de agua en suelo (CRA) para los distintos tratamientos hídricos. La primera y última medida coinciden con el inicio y el final de la estación de riego respectivamente. DDA = día del año.

4.2.2. Crecimiento de ramos

En la figura 4.4 se muestra la evolución de la longitud media de los ramos durante el periodo de estudio.

Los ramos que más crecieron fueron los de los árboles de secano. A continuación los de los árboles de PRD y RDC, en este orden. Los ramos de los árboles del tratamiento FAO fueron los que menos crecieron.

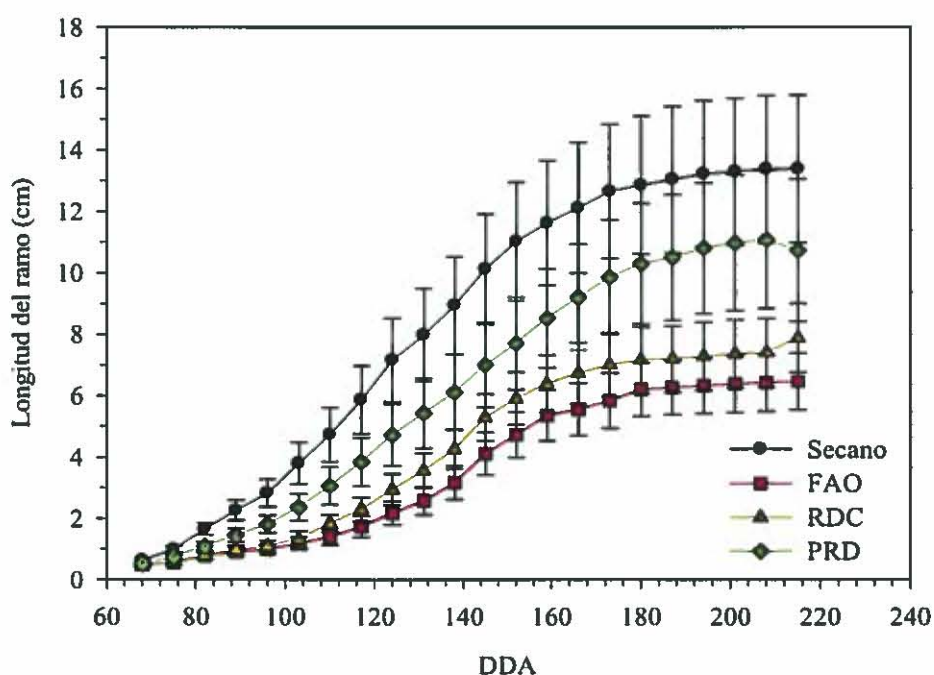


Figura 4.4. Evolución del crecimiento de ramos en los distintos tratamientos hídricos a lo largo del periodo de estudio. DDA = día del año. Los datos son medias de 20 medidas realizadas. Las barras verticales representan \pm el error estándar.

Estos resultados, aparentemente paradójicos, pueden explicarse por las características del suelo de la parcela y por el régimen de lluvias del año experimental. Los datos de la Figura. 4.3 indican, que para el tratamiento de secano, el contenido de agua en el suelo fue relativamente elevado (por encima de la mitad de la capacidad de retención de agua por suelo) hasta mediados de junio; esto, unido a que el suelo en la zona de la parcela donde se da ese tratamiento es bastante profundo (más de 2 m), supuso que los árboles de este tratamiento tuvieran bastante agua en el suelo durante el periodo de máximo crecimiento de los ramos del año. En zonas interiores de la parcela, en la que se daban los tratamientos de RDC, PRD y FAO, el suelo es menos profundo, y el sistema radicular de los árboles más restringido, por lo que los elevados contenidos volumétricos de agua en los bulbos de riego no tuvieron por qué suponer una mayor cantidad de agua disponible para cada árbol. A esto hay que añadir que la zona de la parcela en la que se tuvo el tratamiento de Secano está mejor aireada que otras zonas del interior, registrándose habitualmente una menor incidencia de las enfermedades fúngicas típicas del olivo, las cuales afectan al crecimiento.

Las curvas de crecimiento de todos los tratamientos mostraron una dinámica de crecimiento de los ramos habitual en la zona, con el comienzo en la segunda mitad de febrero, un periodo de crecimiento rápido en abril y mayo, una ralentización en junio y un cese del crecimiento a principios de agosto.

4.2.3. Estado fenológico

Los resultados obtenidos tras el seguimiento fenológico en cada tratamiento se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Evolución del estado fenológico en cada uno de los tratamientos considerados, según la clasificación de Colbrant y Fabre (1975).

Día del año	Estados fenológicos en los tratamientos hídricos considerados			
	Secano	FAO	RDC	PRD
68	C	B	B	B
75	C	C	C	C
82	C	C	C	C
89	D	D	D	D
96	E	E	E	E
103	E	E	E	E
110	E	E	E	E
117	F	F	F	F
124	F ^I	F ^I	F ^I	F ^I
131	F ^I	F ^I	F ^I	F ^I
138	H	G	H	H
145	I	I-H	H	I
152	I ^I	I	I	I
159	I ^I	I ^I	I ^I	I ^I

En el periodo de estudio no se apreciaron diferencias destacables entre tratamientos, en lo que al estado fenológico se refiere.

4.2.4. Evolución del área foliar en árboles regados deficitariamente

Los resultados de las medidas realizadas el 25 de marzo para determinar el área foliar de árboles representativos de cada tratamiento de riego deficitario se muestran en las Tablas 4.2, 4.3 y 4.4.

En la tabla 4.2 se muestran el número total de hojas por árbol. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de la determinación del área foliar de las muestras de hoja de cada tratamiento que se midieron para poder expresar los datos de la Tabla 4.2 en forma de área foliar total de cada árbol. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.2. Número de sectores en que se dividieron las copas de los olivos elegidos en cada tratamiento, número de hojas por cada sector y el número total de hojas del árbol, obtenidas por extrapolación.

Árbol	Nº de sectores de copa	Nº de hojas del sector	Número total de hojas del árbol
PRD-1	10,3	15.481	159.454
PRD-2	5,8	24.555	142.419
PRD-3	7	22.307	156.150
RDC-1	6,6	15.692	103.565
RDC-2	5,5	26.239	144.316
RDC-3	6,5	17.463	113.511

Tabla 4.3. Número de hojas de las muestras tomadas de cada árbol objeto de estudio, área foliar (AF) de la muestra y AF resultante por hoja.

Árbol	Nº de hojas de la muestra	AF total (mm ²)	AF media por hoja (mm ²)
PRD-1	188	29.866,58	158,86
PRD-2	214	39.282,18	183,56
PRD-3	159	42.169,87	265,22
RDC-1	169	29.654,62	175,47
RDC-2	184	37.673,16	204,75
RDC-3	168	41.480,97	246,91
Totales	1.082	220.127,38	203,44

De la Tabla 4.4 se deduce que, el 25 de marzo, los árboles del tratamiento PRD tenían un AF media de 30,96 m² y los del tratamiento RDC 25,25 m².

Tabla 4.4. Número total de hojas en cada árbol objeto de estudio. AF media de la hoja (mm^2) y AF total (m^2) por árbol.

Árbol	Número total de hojas	área media de hoja (mm^2)	AF total (m^2)
PRD-1	159.454	158,86	25,33
PRD-2	142.419	183,56	26,14
PRD-3	156.150	265,22	41,41
RDC-1	106.458	175,47	18,17
RDC-2	134.871	204,75	29,55
RDC-3	121.583	246,91	28,03

Con los datos de evolución del AF de los 20 ramos por tratamiento se determinó la dinámica del AF de cada árbol muestreado, como puede verse en la Figura 4.5.

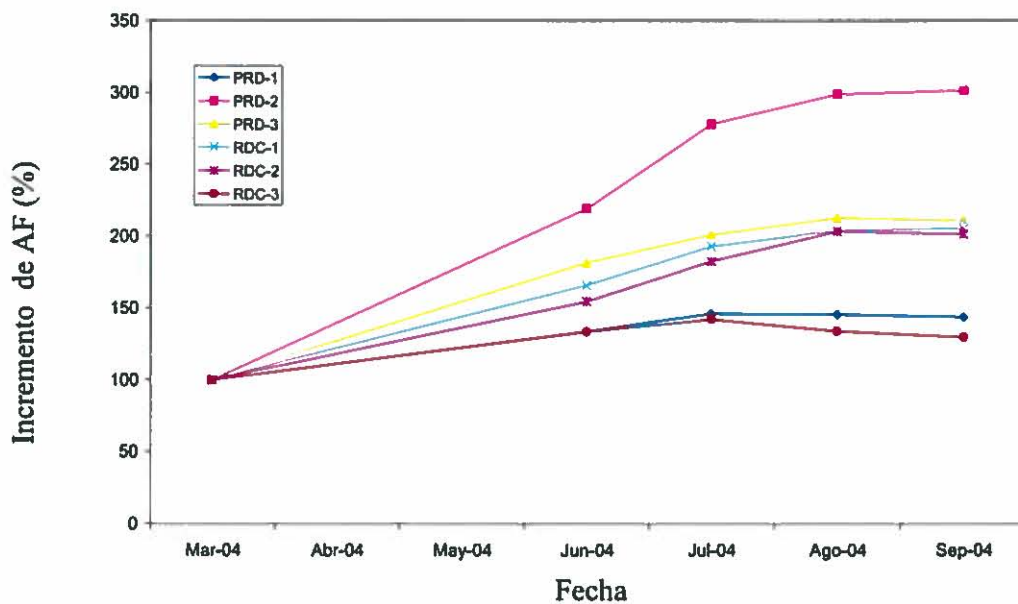


Figura 4.5. Evolución del área foliar de cada árbol muestreado, expresada como porcentaje del AF determinada el 25 de marzo al 4 de septiembre. Cada punto representa la media de 20 ramos.

Siguiendo el proceso explicado anteriormente, a partir del número de hojas por árbol y del AF media calculada, se obtiene el AF total de cada árbol para cada fecha de muestreo, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 4.6.

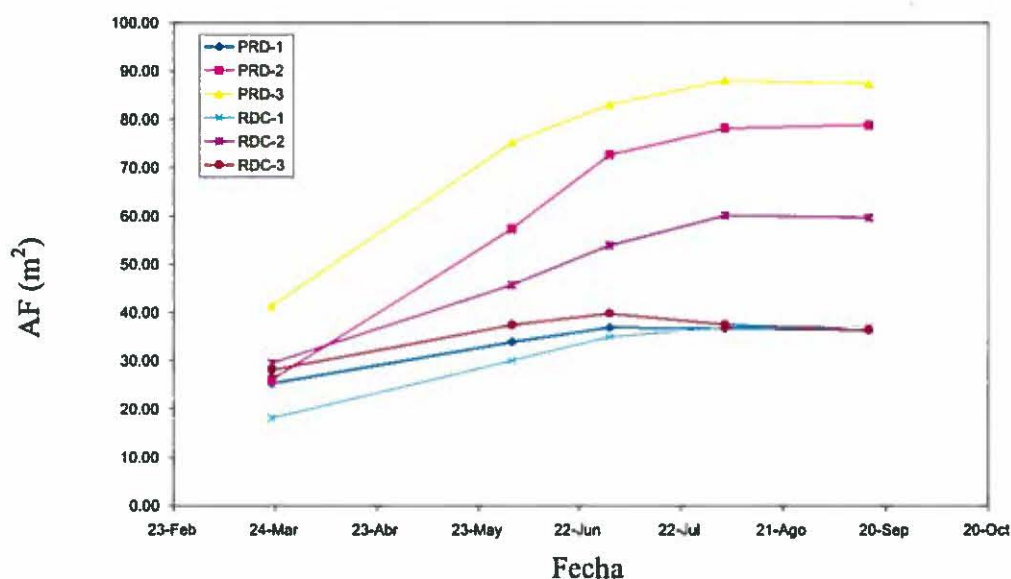


Figura 4.6. Evolución del AF total de los árboles objeto del ensayo. Cada punto representa la media de 20 ramos.

Como puede observarse en la figura, los árboles PRD tuvieron un mayor desarrollo foliar que los RDC. Estas diferencias, una vez más, no son necesariamente atribuibles al tratamiento hídrico, ya que las características del suelo y de la plantación no eran homogéneas entre ambos tratamientos.

4.2.5. Potencial hídrico del tronco

En la Tabla 4.5 se muestra la evolución estacional del potencial hídrico del tronco, con datos que fueron tomados al amanecer y a mediodía.

En las medidas realizadas al amanecer en los meses de junio y julio no se apreciaron diferencias en los valores de potencial hídrico del tronco entre árboles pertenecientes a tratamientos hídricos distintos.

En las medidas realizadas en julio, los valores mayores de potencial hídrico en los olivos se obtuvieron en el tratamiento FAO, en las medidas realizadas a mediodía. En septiembre las medidas se realizaron el segundo día del mes, por lo que los tratamientos deficitarios no se vieron afectados por el aumento del riego, ya que la dosis de riego no fue del 100% de ET_c hasta el día 6 de ese mes, DDA 251 (Figura 4.2). Este

mes encontramos diferencias significativas ($P<0.05$) entre los tratamientos de secano y de riego, tanto al amanecer como a mediodía. Sin embargo, no se encontraron diferencias entre el potencial hídrico del tronco entre los árboles FAO y los que recibieron riegos deficitarios. Los valores obtenidos al amanecer en los olivos de secano, por lo general, se encontraban por debajo de -0.50 MPa (Tabla 4.5), un valor considerado por muchos como un umbral para el estrés en olivo (Fernández y Moreno, 1999). Aunque ese valor umbral hace referencia al potencial hídrico de la hoja (Ψ_{hoja}), al amanecer el valor del potencial hídrico del tronco se puede considerar equivalente al potencial hídrico de la hoja ($\Psi_{\text{tronco}} \sim \Psi_{\text{hoja}}$).

Tabla 4.5. Valores de potencial hídrico del tronco (Ψ_{tronco}) medidos en árboles objeto de estudio, a principios, mediados y finales del periodo estudiado. Se muestran los valores medidos antes del amanecer (máximos diarios) y a mediodía (mínimos diarios). Los valores son medias de 6 repeticiones. Los valores seguidos por la misma letra no son estadísticamente diferentes (diferencia en el nivel del $\pm 5\%$).

Mes	Tratamiento	Medidas de Ψ_{tronco} (MPa)	
		Antes del amanecer	Mediodía
Junio	Secano	-0.36a	-1.73a
	FAO	-0.38a	-1.71a
	RDC	-0.49a	-1.58a
	PRD	-0.42a	-1.44a
Julio	Secano	-0.68a	-1.88b
	FAO	-0.55a	-1.40a
	RDC	-0.77a	-1.49b
	PRD	-0.65a	-1.52b
Septiembre	Secano	-1.48b	-2.70b
	FAO	-0.70a	-1.35a
	RDC	-0.77a	-1.27a
	PRD	-0.81a	-1.50a

Nuestros resultados muestran que la reducción de Ψ_{tronco} observada en PRD y FAO, fue similar a la del tratamiento RDC.

4.1.6. Intercambio gaseoso de las hojas

4.2.6.1. Conductancia estomática

La Tabla 4.6 muestra la evolución de los valores máximos de conductancia estomática medidos en los cuatro tratamientos objeto de estudio durante el periodo experimental. En septiembre los valores de esta variable fueron significativamente menores ($P<0.05$) en los árboles de secano que en los árboles regados. No se encontraron diferencias entre los distintos tratamientos que recibieron riego durante el periodo de estudio en esta época del año. Los valores registrados en árboles RDC fueron menores que en PRD y FAO, aunque las diferencias fueron significativas tan solo en julio.

Tabla 4.6. Valores máximos diarios de conductancia estomática (g_s) medidos en árboles pertenecientes a los distintos tratamientos hídricos durante el periodo de riego. Los valores seguidos por la misma letra no son estadísticamente diferentes (diferencia en el nivel del $\pm 5\%$).

Mes	Tratamiento hídrico	g_s (mol m ⁻² s ⁻¹)
Junio	Secano	0.251a
	FAO	0.260a
	RDC	0.239a
	PRD	0.261a
Julio	Secano	0.223ab
	FAO	0.242b
	RDC	0.183a
	PRD	0.241b
Septiembre	Secano	0.140a
	FAO	0.236b
	RDC	0.189ab
	PRD	0.226b

4.2.6.2. Fotosíntesis neta

La tabla 4.7 muestra los valores de fotosíntesis neta (P_N) medidos en los cuatro tratamientos durante el periodo experimental.

Los valores más altos de P_N pertenecieron siempre a los árboles del tratamiento FAO, aunque las diferencias, con respecto al resto de los tratamientos de riego, sólo fueron significativas en julio y con respecto al tratamiento RDC. Esta excepción no nos permite afirmar que P_N fuese más favorable para los olivos bajo el tratamiento hídrico PRD que para los RDC.

En septiembre no se encontraron diferencias significativas entre ambos tratamientos, ni siquiera entre los de riego y el de seco. Las condiciones meteorológicas del 2 de septiembre, día en que se realizaron las medidas este mes, probablemente afectaron el resultado, al tratarse de un día nublado.

Tabla 4.7. Valores máximos diarios de fotosíntesis neta (P_N) medidos en árboles pertenecientes a los distintos tratamientos hídricos durante el periodo de riego. Los valores seguidos por la misma letra no son estadísticamente diferentes (diferencia en el nivel del $\pm 5\%$).

Mes	Tratamiento hídrico	P_N ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Junio	Secano	18.3a
	FAO	19.5a
	RDC	18.6a
	PRD	18.6a
Julio	Secano	14.6ab
	FAO	16.0b
	RDC	11.6a
	PRD	15.3b
Septiembre	Secano	11.8a
	FAO	16.1a
	RDC	13.6a
	PRD	14.0a

La Figura 4.7 muestra la evolución diaria de Ψ_{tronco} , g_s y P_N de árboles representativos de los cuatro tratamientos hídricos para el día 2 de septiembre. También se muestra la evolución de la R_s y de la D_a , que son las dos variables meteorológicas que más influyen en el estado hídrico de la planta y en el intercambio gaseoso de la hoja. Los datos de potencial confirman los resultados mostrados en la Tabla 4.7: diferencias nulas en Ψ_{tronco} entre los árboles regados; los valores de g_s para los tratamientos RDC y PRD estaban entre los del tratamiento de secano y el FAO la mayor parte del día, sin que se observasen diferencias claras entre ellas. Con respecto a P_N , los valores mayores se registraron en FAO, en casi todas las horas en que se midió esta variable.

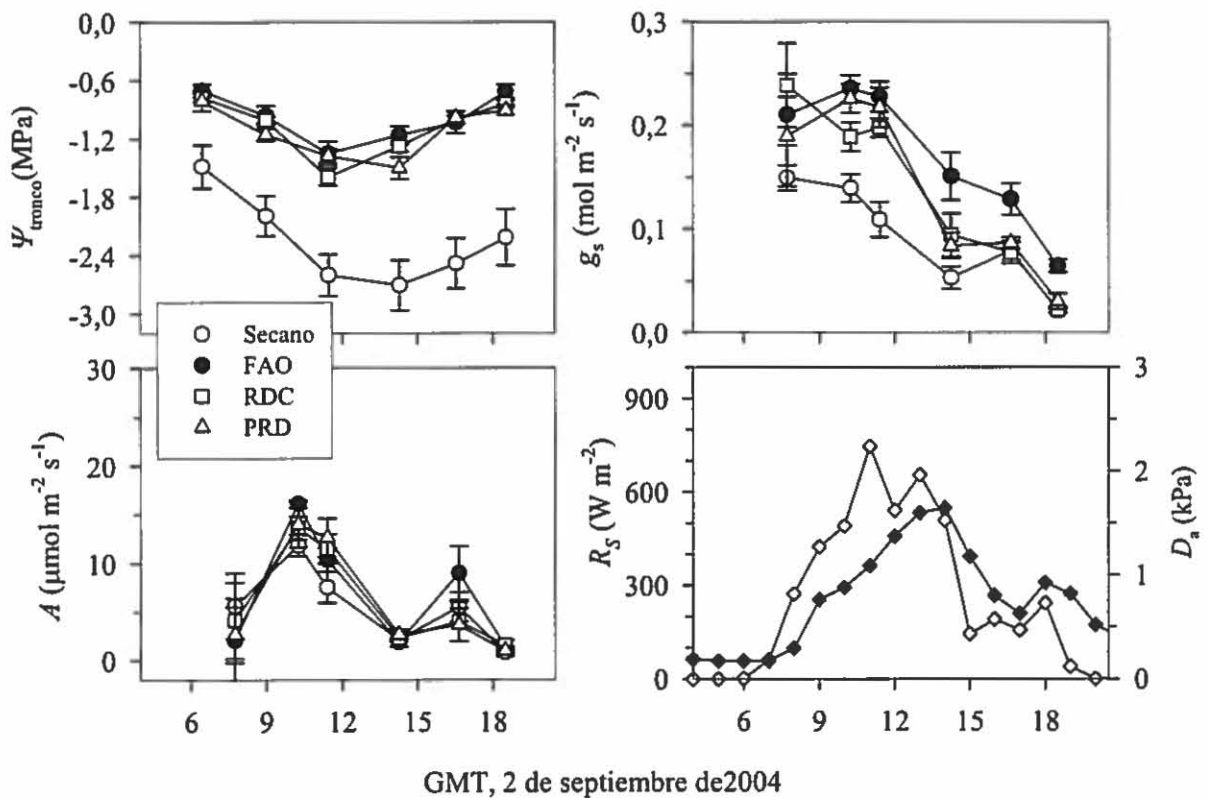


Figura 4.7. Ciclo diario de la fotosíntesis neta (P_N), potencial hídrico del tronco (Ψ_{tronco}) y conductancia estomática (g_s) de árboles representativos de los cuatro tratamientos hídricos considerados, medidos durante el transcurso del 2 día de septiembre. Cada punto es la media de seis medidas, y las barras verticales representan el error estándar. Además se representan los valores de radiación solar global (R_s , símbolos abiertos) y el déficit de presión de vapor del aire (D_a , símbolos cerrados) registrados durante los días de medida. GMT = hora de Greenwich.

4.2.7. Cuantificación del consumo hídrico en los árboles regados deficitariamente

En la Figura 4.8 se muestra el consumo de agua diario por unidad de área foliar (E_p) obtenido a partir del flujo de savia medido en árboles representativos de los tratamientos hídricos PRD y RDC, en diferentes momentos a lo largo del periodo de estudio. También se muestran los valores medios de ET_c y θ para esos periodos y tratamientos. En la Figura 4.8.a se muestra con una flecha el momento de inicio del riego, el día 26 de mayo (DDA 147). Puede verse una respuesta clara de E_p al comienzo del riego. Poco después del incremento de humedad en el suelo por el riego (en esta época los tratamientos deficitarios se riegan con el 100% de la ET_c), y debido a la demanda atmosférica típica de esta época del año, insuficiente para producir un aumento en la transpiración, pero no tanto como para producir el cierre estomático, E_p aumentó su valor por encima de $2.0 \text{ l m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. A finales de julio (Figura 4.8.b) y de agosto (Figura 4.8.c) el riego fue reducido para ajustarlo a los requerimientos impuestos por los tratamientos deficitarios, lo que podría explicar la bajada en el consumo de agua por unidad de área foliar (E_p) a valores entre 1 y $1.5 \text{ l m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

En todo caso, el aspecto más importante que puede verse en esta figura, es que no se encontraron diferencias en la transpiración por unidad de área foliar entre los árboles de los dos tratamientos de riego deficitario, para la mayor parte del periodo experimental.

Los valores de flujo de savia registrados en los árboles experimentales muestran una dinámica de transpiración similar tanto en los olivos PRD como en los RDC, y no se muestran variaciones significativas en lo que respecta a los caudales de savia entre olivos RDC y PRD. La Figura 4.9 muestra caudales ligeramente superiores por unidad de área foliar en árboles PRD que en árboles RDC. Esto sin embargo podría ser debido a errores en la determinación del AF o de los caudales reales de savia.

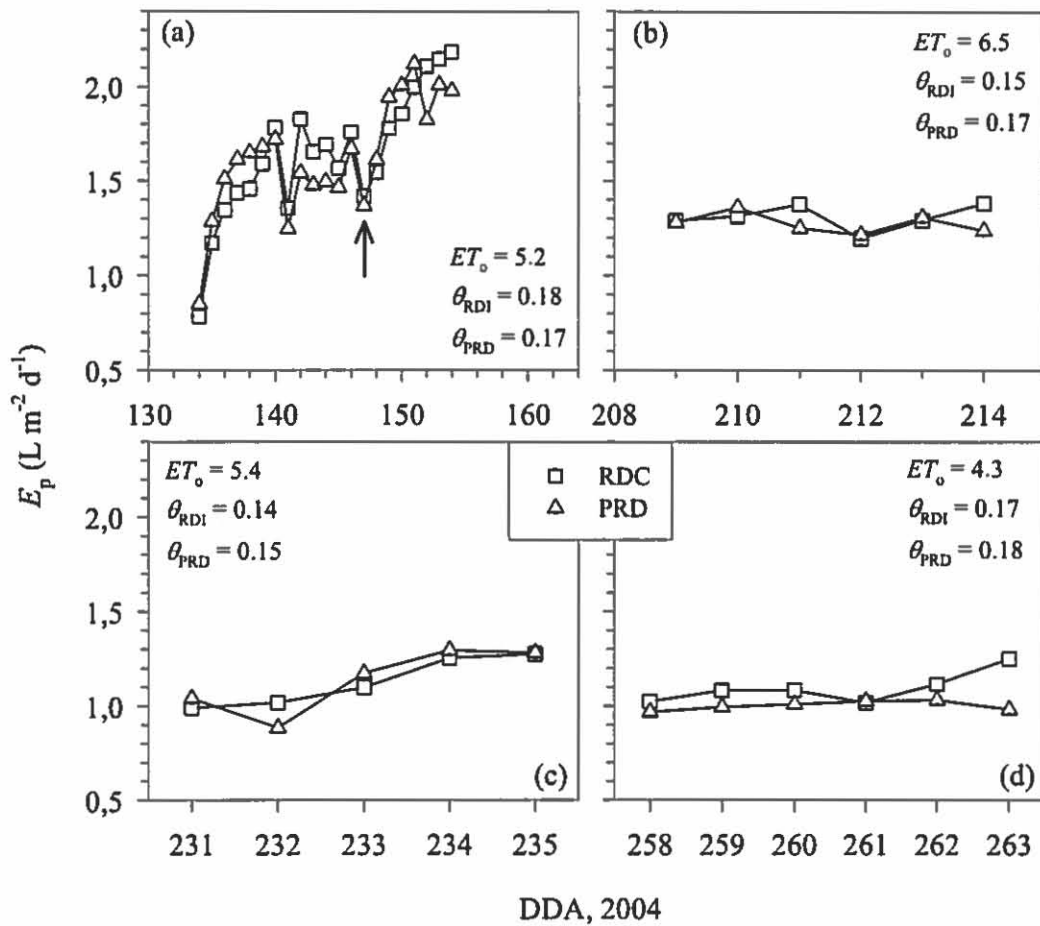


Figura 4.8. Medidas diarias de transpiración por unidad de área foliar (E_p) estimadas a partir de del flujo de savia medido en árboles PRD y RDC, a mediados del mes de mayo (a), final del mes de julio (b), final del mes de agosto (c) y mediados del mes de septiembre (d). La flecha en la figura (a) muestra el comienzo del tratamiento de riego. En cada gráfica se indica el valor medio de la evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm) para el periodo y el contenido volumétrico de agua en el suelo (θ , $m^3\ m^{-3}$) de ambos tratamientos hídricos. DDA = día del año.

Los valores registrados de E_p están de acuerdo con los que se conocen para el olivo, excepto aquellos al principio de la estación de riego, a excepción de los mencionados anteriormente. Probablemente el clima favorable y el estado de agua del suelo en aquel momento, además de la escasa AF por árbol después de la poda de invierno, fueron los responsables de los altos valores de E_p por metro cuadrado de hoja registrados durante esos días. En un trabajo anterior realizado en la misma parcela experimental (Fernández y Moreno, 1999), se obtuvieron unas medidas de flujo de savia en olivos bien regados que mostraron un pico de E_p de $1.65\ L\ m^{-2}\ d^{-1}$, durante un día de valores máximos de R_s y D_a de $850\ W\ m^{-2}$ y $3\ kPa$, respectivamente.

La alternancia de la zona del suelo regada en los árboles PRD no causó cambios en el flujo de savia de las raíces principales instrumentadas a cada lado de los árboles, ni en otras posiciones como tronco o ramas principales (Figura 4.10), a pesar de los descensos de θ en el lado seco del suelo justo antes de realizar el cambio de la zona de riego, que se producía cada tres semanas.

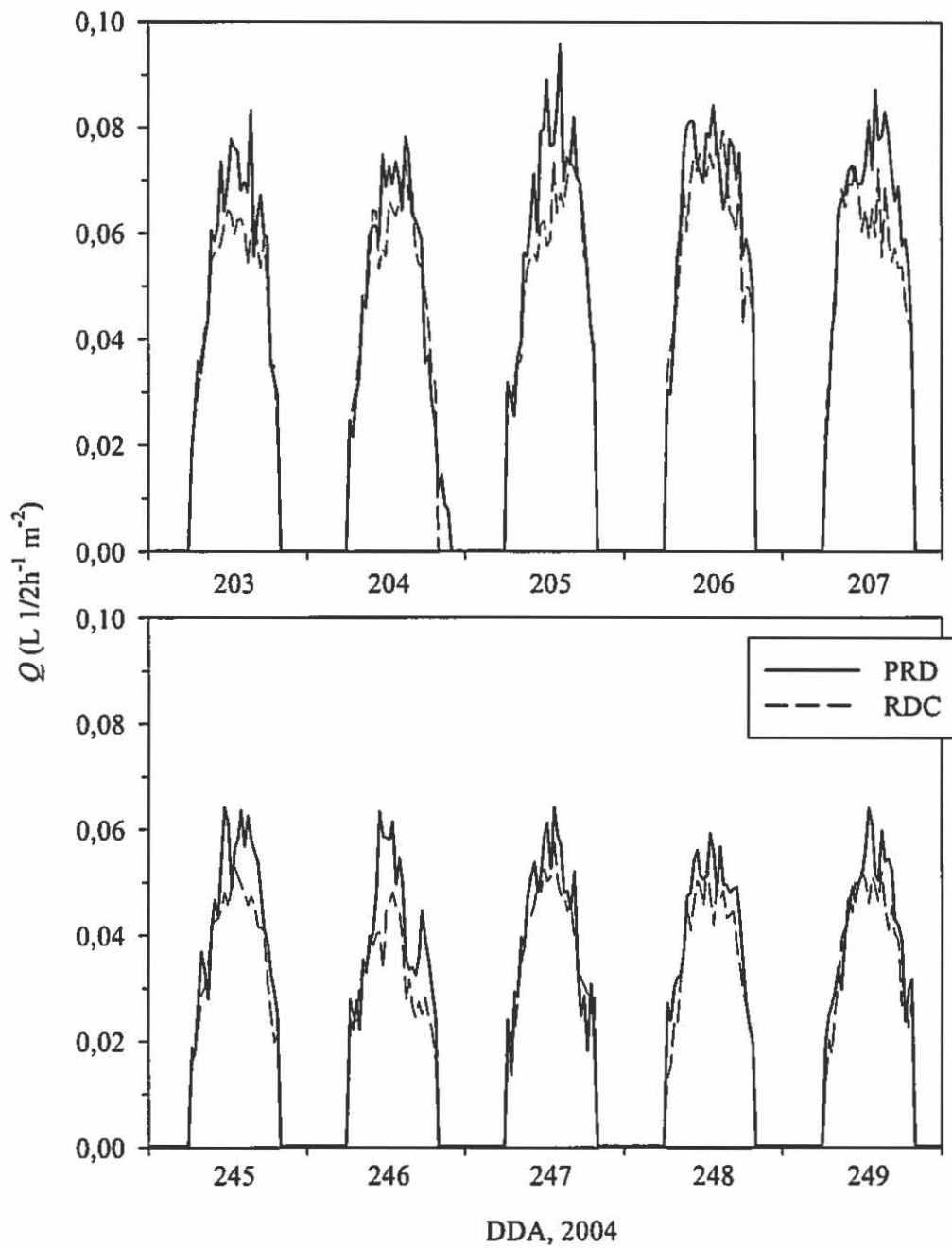


Figura 4.9. Evolución diaria del flujo de savia por unidad de área (Q) calculado a partir de las medidas de flujo de savia realizadas en el tronco de árboles representativos de los tratamientos RDC y PDR desde el final de julio hasta principios de septiembre. Los valores representados son media de los resultados obtenidos de tres sensores instalados en un árbol RDC y de dos sensores instalados en un árbol PRD.

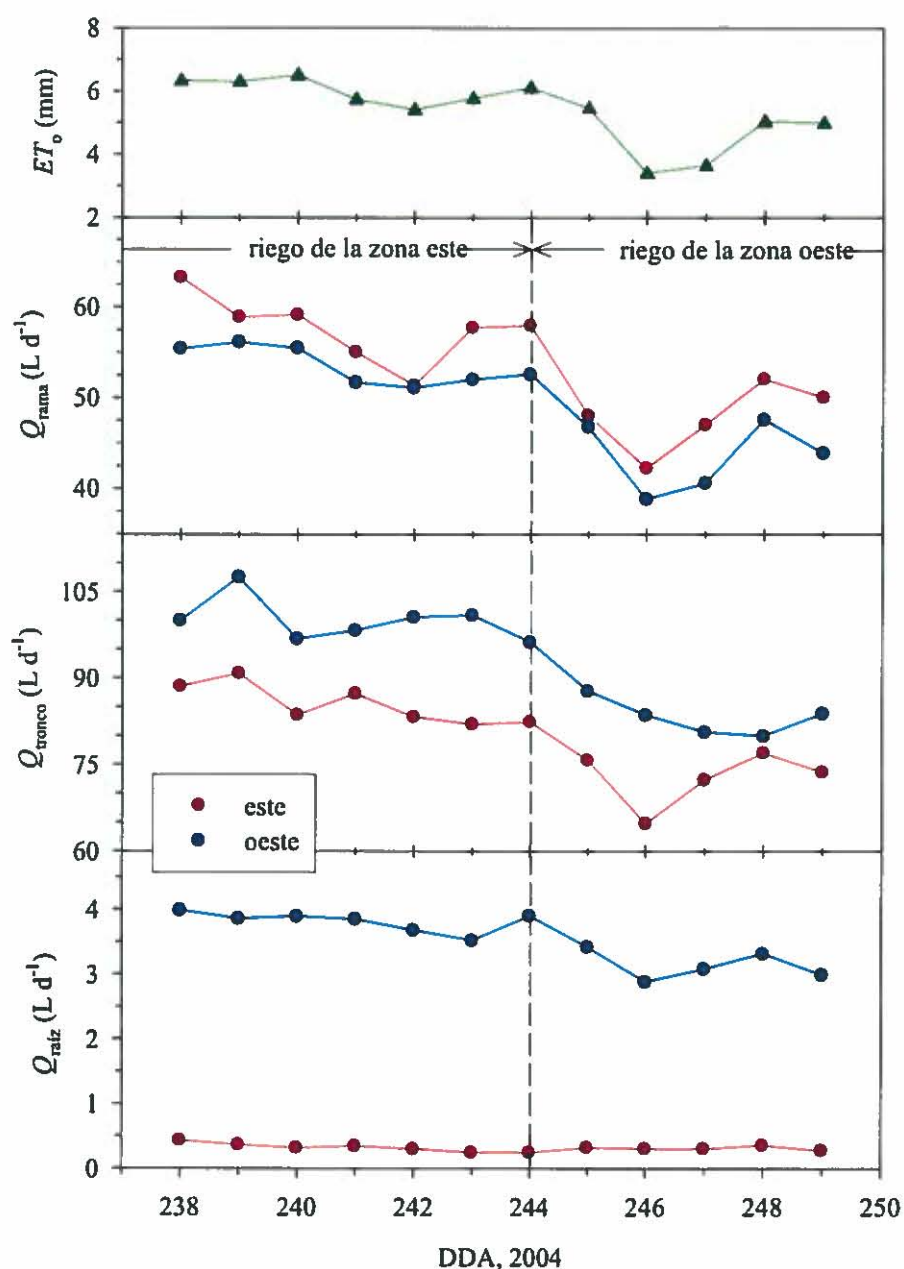


Figura 4.10. Evolución diaria de los flujos de savia estimados a partir de la técnica de pulso de calor instalada en dos raíces principales (Q_{raiz}) de un árbol de tratamiento PRD. La medición se realizó a finales de agosto y principios de septiembre de 2004, correspondiendo con unos pocos días antes y después de un cambio de riego del lado este al oeste. Además muestra la evolución de los flujos de savia estimados por los sensores instalados a cada lado de la base del tronco (Q_{tronco}) y los instalados en dos ramas principales del árbol (Q_{rama}), una orientada hacia el este y la otra hacia el oeste. Por último, se muestran los valores de evapotranspiración de referencia (ET_0) para los días de medida. DDA= día del año (DDA 232 = 20 de agosto)

5. Conclusiones

5. Conclusiones

No observamos mejoras apreciables en las variables estudiadas, al comparar los resultados de los árboles PRD con los RDC. En ambos tratamientos deficitarios la conductancia estomática estuvo restringida, en comparación con FAO. Los resultados de esta variable, junto con los de flujo de savia, muestran que la reducción de la transpiración fue similar en ambos tratamientos deficitarios.

La alternancia del riego en PRD no tuvo una influencia apreciable en el agua absorbida por raíces principales que exploraban ambos lados del árbol. Tampoco se encontraron diferencias en los flujos de savia entre ambos lados del tronco, ni en ramas principales coincidentes o no con el lado regado.

Estos resultados, junto con otros de la literatura, sugieren que el riego localizado tradicional origina las condiciones necesarias para que se de un efecto de emisión de señales por parte de las raíces que permanecen fuera de los bulbos de riego durante el periodo estival, de manera que no es necesario alternar el riego, a un lado y otro del árbol, para que se favorezca el control estomático por parte de esas raíces.

Por lo tanto, este trabajo sugiere que el riego PRD no aporta ninguna ventaja adicional con respecto al riego RDC. Teniendo en cuenta, además, que el riego PRD es más costoso de instalar y más difícil de manejar que el RDC, se concluye que no hay ninguna razón agronómica que justifique el uso de PRD en plantaciones de olivar.

6. Bibliografía

6. Bibliografía

- Abdel-Rahman A A and El-Sharkawi H M 1974. Response of olive and almonds orchards to partial irrigation under dry-farming practices in semi-arid regions: II. Plant-soil water relations in olive during the growing season. *Plant Soil* 41, 13-31.
- Alegre S y Girona J 1997. Riego deficitario controlado en olivo. *Fruticultura profesional* 88: 70-78.
- Allen R 2002. REF-ET Reference Evapotranspiration Software. Kimberly Research and Extension Center. University of Idaho. <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/>.
- Allen R, Pereira L S, Raes D and Smith M 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements- FAO irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>.
- Augé R M and Moore J L 2002. Stomatal response to nonhydraulic root-to-shoot communication of partial root drying in relation to foliar dehydration tolerance. *Environ. Exp. Bot.* 47, 217-229.
- Bonachela S., Orgaz F., Villalobos F.J., Fereres E., 2001. Soil evaporation from drip irrigated olive orchards. *Irrigation Science*, 20: 65-71.
- Burman R., Pochop L.O., 1994. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. *Developments in Atmospheric Science*, 22, Elsevier Science B.V.
- Centritto M, Wahbi S, Serraj R and Chaves M M 2005. Effects of partial rootzone drying (PRD) on adult olive tree (*Olea europaea*) in field conditions under arid climate. II. Photosynthetic responses. *Agric. Ecosys. Environ.* 106, 303-311.
- Chalmers D J, Burge G, Jerie P H and Mitchell P D 1986. The mechanism of regulation of Bartlett pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111, 904-907.
- Cifre J, Bota J, Escalona J M, Medrano H and Flexas J 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.). An open gate to improve water-use efficiency? *Agric. Ecosys. Environ.* 106, 159-170.
- Colbrant P et Fabre P 1975. L'olivier. Les stades repérés de l'olivier. Pp24 et 25.
- Denney J O and McEachern G R 1985. Modelling the thermal adaptability of the olive (*Olea europaea* L.) in Texas. *Agric. For. Meteorol.* 35: 309-327.

- d'Andria R, Morelli G, Giorio P, Patumi M, Vergari G, Fontanazza G 1998. Yield and oil quality of young olive trees grown under different irrigation regimes. Proc. del Third International Symposium on Olive Growing. Chania, Creta, 22-26 septiembre. Pp. 185-188.
- d'Andria R, Lavini A, Morelli G, Patumi M, Terenziani S, Calandrelli D and Fragnito F 2004. Effects of water regimes on five pickling and double aptitude olive cultivars (*Olea europaea* L.) J. Hort. Sci. Biotech. 79, 18-25.
- Davies W J, Bacon M A, Thompson D S, Sobeih W and Rodríguez L 2000. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signalling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. J. Exp. Bot. 350, 1617-1626.
- Davies W J, Wilkinson S and Loveys B 2001. Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. New Phytol. 153, 449-460.
- de Souza C R, Maroco J P, dos Santos T P, Rodrigues M L, Lopes C M, Pereira J S and Chaves M M 2003. Partial rootzone drying: regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field-grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. Moscatel). Funct. Plant Biol. 30, 653-662.
- de Souza C R, Maroco J P, dos Santos T P, Rodrigues M L, Lopes C M, Pereira J S and Chaves M M 2005. Control of stomatal aperture and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. Agric. Ecosys. Environ. 106, 261-274.
- Denney J O and McEachern G R 1985. Modelling the thermal adaptability of the olive (*Olea europaea* L.) in Texas. Agric. For. Meteorol. 35: 309-327.
- Dry P R and Loveys B R 1999. Grapevine shoot growth and stomatal conductance are reduced when part of the root system is dried. Vitis 38, 151-156.
- Díaz-Espejo A, Verhoef A, Fernández J E, Villagarcía L 2004. Use of high resolution weighing lysimeters to estimate main driving variables related to soil evaporation in a drip irrigated olive orchard. 2004. In: Proc. of the 5th Internacional Symposium on Olive Growing. 27 September – 2 October, Izmir, Turkey, pp. 30.
- dos Santos T P, Lopes C M, Rodrigues M L, de Souza C R, Maroco J P, Pereira J S, Silva J R and Chaves M M 2003. Partial rootzone drying: effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (*Vitis vinifera*). Funct. Plant Biol. 30, 663-671.

- Doorenbos J and Pruitt W O, 1977. Guidelines for prediction of crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper Nº. 24, 2nd edition. FAO, Rome.
- Dry P R and Loveys B R 1999. Grapevine shoot growth and stomatal conductance are reduced when part of the root system is dried. *Vitis* 38, 151-156.
- Dry P R, Loveys B R, Düring H and Botting D G 1996. Effects of partial rootzone drying on grapevine vigour, yield composition of fruit and use of water. In: C.S. Stockley, A.N. Sas, R.S. Johnstone and T.H. Lee (eds.), Proc. 9th Aust. Wine Ind. Techn. Conf., 128-131. Adelaide, Australia. (Winetitles: Adelaide).
- Dry P R, Loveys B R and Düring H 2000a. Partial drying of the rootzone of grape. I. transient changes in shoot growth and gas exchange. *Vitis* 39, 3-7.
- Dry P R, Loveys B R, Düring H 2000b. Partial drying of the rootzone of grape. II. Changes in the pattern of root development. *Vitis* 39, 9-12.
- Dry P R, Loveys B R, McCarthy M G and Stoll M 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. *J. Int. Sci., Vigne Vin.* 35:129-139.
- Fernández J.E., Moreno F., Cabrera F., Arrue J.L. Martín-Aranda J., 1991. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. *Plant and Soil*, 133: 239-251.
- Fernández J.E., Díaz-Espejo A., Palomo M.J., Girón I.F., Moreno F., 1998. *Riego y fertilización del olivar en la comarca de El Aljarafe (Sevilla)*. Folleto divulgativo, 32 pp.
- Fernández J E and Moreno F, 1999. Water use by the olive tree. *J. Crop Prod.* 2, 101-162.
- Fernández J E, Díaz-Espejo A, Palomo M J, Durán P J, Girón I F, Chamorro V and Infante J M 2004. Correction factors for deriving actual sap flows from heat pulse velocities measured in the olive tree with the compensation method. Proc. of the VII Simpósio Luso-Espanhol de Relações Hídricas das Plantas, Faro (Portugal), 27-29 September. In press.
- Fernández J E, Moreno F, Girón I F and Blázquez O M 1997. Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant Soil* 190, 179-192.
- Fernández J E, Palomo M J, Díaz-Espejo A, Clothier B E, Green S R, Girón I F and Moreno F 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agric. Water Manage.* 51, 99-12.

- Fernández J E, Palomo M J, Díaz-Espejo A and Girón I F 2003. Influence of partial soil wetting on water relation parameters of the olive tree. *Agronomie* 23, 545-552.
- Fernández J.E., Clothier B.E., van Noordwijk M., 2000. Water uptake. *Root Methods: A Handbook*. (Eds. A.L. Smith y col.) Springer-Varlag, pp 461-507.
- Fernández-Escobar R 2001. Fertilización. In: Barranco, D., Fernández-Escobar R and Rallo L. (Eds.), *El Cultivo del Olivo*. Junta de Andalucía y Ediciones Mundi-Prensa, pp. 255-284.
- Fernández J E 2002. Riego del Olivar. Tecnologías del agua en zonas agrícolas y verdes. Departamento de Química Agrícola, Universidad de Sevilla. 15 pp.
- Fereres E and Castel J R 1981. Drip Irrigation Management. Division of Agricultural Sciences, University of California, Leaflet 21259.
- Fereres F 1984. Variability in Adaptive Mechanism to Water Deficits in Annual and Perennial Crop Plants. *Bulletin Société Botanique de France. Actualités Botaniques*. 131: 17-32.
- Fereres E, Goldhamer D A and Parsons L R 2003. Irrigation water management of horticultural crops. *HortSci*. 38, 1036-1043.
- Gavilán P and Berengena J 2000. Comportamiento de los métodos Penman-FAO y Penman-Monteith-FAO en el Valle medio del Guadalquivir. Proc. of the XVIII Congreso Nacional de Riegos. Huelva, 20-22 junio. pp. 7, edited on CD.
- Girona J 2001. Strategia di deficit irriguo controllato nell'olivo. In: Gestione dell'acqua e del territorio per un'olivicultura sostenibile, Naples, 24-28 September. COI, SeSIRCA, ISPAIM.
- Goldhamer D A, Dunai J and Ferguson F 1993 Water use requirements of manzanillo olives and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Hort* 335: 365-371.
- Goldhamer D A, Dunai J and Ferguson F 1994. Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation, *Acta Hort*. 356: 172-175.
- Goldhamer D A 1999. Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Hort*. 474, 369-372.
- Goldhamer D A 1997. Regulated deficit irrigation for California canning olives. Proc. del Third International Symposium on Olive Growing, Chania, Creta, 22-26 septiembre. Pp. 369-372.
- Goldhamer D A, Salinas M, Crisosto C, Day K R, Soler M and Moriana A 2002. Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Hort*. 592, 345-350.

- Cómez J.A., Giráldez J.V., Fereres E., 2001. Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area. *Agricultural Water Management*, 49(1): 65-76.
- Gowing D J, Davies W J and Jones H G 1990. A positive root-sourced signal as an indicator of soil drying in apple, *Malus×domestica* Borkh. J. Exp. Bot. 41, 1535-1540.
- Granier A 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* 3, 309-320.
- Green S R, Clothier B E and Jardine B 2003. Theory and practical application of heat-pulse to measure sap flow. *Agron. J.* 95, 1371-1379.
- Hartmann H.T., 1953. Effect of vinter chilling on fruitfulness and vegetative growth in the olive. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 62 :184-190
- Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice* Nº. 70
- Kang S, Hu X, Du T, Zhang J and Jerie P 2003a. Transpiration coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of pear tree (*Pyrus communis* L.) under alternative partial root-zone drying conditions. *Hydrol. Process* 17, 1165-1176.
- Kang S, Hu X, Goodwin I and Jerie P 2002. Soil water distribution, water use, and yield response to partial root zone drying under a shallow groundwater table condition in a pear orchard. *Sci. Hort.* 92, 277-291.
- Kang S, Hu X, Jerie P and Zhang J 2003b. The effects of partial rootzone drying on root, trunk sap flow and water balance in an irrigated pear (*Pyrus communis* L.) orchard. *J. Hydrol.* 280, 192-206.
- Kirda C, Cetin M, Dasgan Y, Topcu S, Kaman H, Ekici B, Derici M R and Ozguven A I 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agric. Water Manage.* 69, 191-202.
- Lavee S, Nashef M, Wodner M and Harshemesh H 1990. The effect of complementary irrigation added to old olive trees (*Olea europaea* L.) cv. Souri on fruit characteristics, yield and oil production. *Adv. Hort. Sci.* 4, 135-138.
- Loussert R et Brousse G 1978. L'olivier. Ed. G P Maisonneuve et Larose. Paris, France. 465 Pp.
- Loveys B R, Dry P R, Stoll M, McCarthy M G 2000. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Hort.* 537, 187-197.

- Mantovani C E, Berengena J, Villalobos F J, Orgaz F and Fereres E 1991. Medidas y estimaciones de la evapotranspiración real del trigo de regadío en Córdoba. Actas IX Jornadas Técnicas de Riegos. Granada.
- Melcher, P.J., F.C. Meinzer, D.E. Yount, G. Goldstein and U. Zimmermann. 1998. Comparative measurements of xylem pressure in transpiring and non-transpiring leaves by means of the pressure chamber and the xylem pressure probe. *Journal of Experimental Botany*, 327: 1757-1760.
- Michelakis N 1990. Yield response of table and oil olive varieties to different water use levels under drip irrigation. *Acta Hort.* 286: 271-275.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) 1999.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) 2004.
- Moreno F., Vachaud G., Martín-Aranda J, 1983. Caracterización hidrodinámica de un suelo de olivar. Fundamentos teóricos y métodos experimentales. *An. Edad. Agrobiol.* 42: 695-721.
- Moriana A, Orgaz F, Pastor M and Fereres E 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 128, 425-431.
- Motilva M J, Tovar M J, Romero M P, Alegre S and Girona J 2000. Influence of regulated deficit irrigation strategies applied to olive trees (*Arbequina* cultivar) on oil yield and on oil composition during the fruit ripening period. *J. Sci. Food Agric.* 80, 2037-2043.
- Mudarra J,L,. 1998. *Reconocimiento de los suelos de la comarca de El Aljarafe (Sevilla)*. Publicaciones del CSIC.
- Natali S, Bignami C, Fusari A 1991. Water consumption, photosynthesis, transpiration and leaf water potential in *olea europea* L., cv. "Frantoio", at different levels of available water. *Agric. Medit.* 121, 205-212.
- Orgaz F y Ferreres E 1997 Riego. En el Cultivo del Olivo. Ed. D Barranco y col. 1ª ed. Junta de Andalucía y Grupo Mundi Prensa. Pp.251-272.
- Orgaz F, Fereres E 2001. Riego. En: El Cultivo del Olivo, 4ª edición (Barranco D., Fernández-Escobar R., Rallo L, eds.). Coedición Junta de Andalucía y Ediciones Mundi-Prensa. pp. 285-306.
- Palomo M.J., 2000. *Aplicación del método de compensación de pulso de calor para medir flujo de savia en olivo*. Tesis doctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. 177 pp.

- Palomo M J, Moreno F, Fernández J E, Díaz-Espejo A, Girón I F 2002 Determining waetr consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agric. Water Manage.* 55, 15-35.
- Pastor M and Orgaz F 1994. Riego deficitario del olivar. *Agricultura* 746, 768-776.
- Scholander P F, Hammel H T, Bradstreet E D and Hemmingsen E A 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148: 339-346.
- Sobeih W Y, Dodd I C, Bacon M A, Grierson D and Davies W J 2004. Long-distance signals regulating stomatal conductance and leaf growth in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants subjected to partial root-zone drying. *J. Exp. Bot.* 407, 2353-2363.
- Stikic R, Popovic S, Srdic M, Savic D, Jovanovic Z, Prokic Lj and Zdravkovic J 2003. Partial root drying (PRD): a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. *Bulg. J. Plant Physiol. Special Issue* 2003, 164-171.
- Stoll M, Loveys B and Dry P 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *J. Exp. Bot.* 51, 1627-1634.
- Swanson R. H. y Whitfield D.W.A. 1981. A numerical analysis of heat pulse velocity and practice, *J. Exp. Bot.* 32: 221-239
- Swanson R.H. 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agric. For. Meteorol.* 72: 113-132.
- Swanson R.H. 1962. An instrument for detecting sap movement in woody plants. USDA Forest Service., Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado. Station Paper 68, 16 pp.
- Tardieu F and Davies W J 1992. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. *Plant Physiol.* 98, 540-545.
- Tardieu F and Davies W J 1993. Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant Cell Environ.* 16, 341-349.
- Tognetti R, d'Andria R, Morelli G and Alvino A 2005. The effect of deficit irrigation on seasonal variations of plant water use in *Olea europaea* L. *Plant Soil* 273, 139-155.
- Tognetti R, d'Andria R, Morelli G, Calandrelli D and Fragnito F 2004. Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. *Plant Soil* 263, 249-264.

- Turner N C 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant Soil* 58: 339-366.
- Wahbi S, Wakrim R, Aganchich B, Tahi H and Serraj R 2005. Effects of partial rootzone drying (PRD) on adult olive tree (*Olea europaea*) in field conditions under arid climate. II. Physiological and agronomic responses. *Agric. Ecosys. Environ.* 106, 289-301.
- Wakrim R, Wahbi S, Tahi H, Aganchich B and Serraj R 2005. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agric. Ecosys. Environ.* 106, 275-287.
- Wartinger A, Heilmeyer H, Hartung W and Schulze E-D 1990. Daily and seasonal courses of leaf conductance and abscisic acid in the xylem sap of almond trees [*Prunus dulcis* (Miller) D.A. Webb] under desert conditions. *New Phytol.* 116, 581-587.
- Wilkinson S and Davies W J 2002. ABA-based chemical signalling: the co-ordination of responses to stress in plants. *Plant Cell Environ.* 25, 195-210.
- Yao C, Moreschet S and Aloni B 2001. Water relations and hydraulic control of stomatal behaviour in bell pepper plant in partial soil drying. *Plant Cell Environ.* 24, 227-235.
- Yáñez J., Lachica M., 1971. El olivar. Revisión de las condiciones de cultivo. *Anales de Edafología y Agrobiología.* 30 (7-8): 789-816.